# THÈSE

*Présentée pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS**

*(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)*

**UFR des Sciences Fondamentales et Appliquées**

École doctorale n° 651 :
M.I.M.M.E - Mathématiques - Informatique - Matériaux - Mécanique - Énergétique
Secteur de recherche : **Traitement du Signal et des Images**

**Exploration de *La Joconde* par imagerie multispectrale : développements d'une caméra, d'un éclairage et de traitements d'images.**

Présentée par

**Pascal COTTE**

Soutenue le **10 décembre 2025** devant la Commission d'Examen

**Jury**

Rapporteur : **Pr Mathieu Hébert**, Professeur des Universités, Université Jean Monnet de Saint-Étienne et Institut d'Optique Graduate School, Lab. Hubert Curien / UMR CNRS 5516

Rapporteur : **M. Jean-Baptiste Thomas**, Maître de conférences, Université Bourgogne Europe, Laboratoire IMVIA

Examinateur : **M. Benjamin Bringier**, Maître de conférences, Université de Poitiers, Institut de recherche Xlim, UMR CNRS n°7252

Examinatrice : **Pr Anne Pillonnet**, Professeure des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306.

Examinateur : **M. Lionel Simonot**, Maître de conférences, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306.

Référent : **Pr Daniel Meneveaux**, Professeur des Universités, Université de Poitiers, Institut de recherche Xlim, UMR CNRS n°7252

Pour citer cette thèse :
Pascal Cotte : Exploration de *La Joconde* par imagerie multispectrale : développements d'une caméra, d'un éclairage et de traitements d'images. Université de Poitiers, 2025.
Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>

## Résumé académique

Cette thèse explore l'imagerie multispectrale pour l'étude scientifique des peintures, en portant une attention particulière à *La Joconde* de Léonard de Vinci. Elle présente le développement d'une caméra multispectrale inédite de 240 mégapixels, associée à un système d'éclairage collimaté, conçu pour optimiser la précision spectrale, réduire les réflexions de surface et accroître la dynamique des mesures. Au-delà de l'instrumentation, ce travail introduit la *Layer Amplification Method* (L.A.M.), une méthode d'imagerie scientifique qui amplifie les signaux cachés dans les couches picturales, généralement inaccessibles aux méthodes infrarouges ou radiographiques. Cette approche constitue un véritable déplacement épistémologique : elle redéfinit les conditions de visibilité des stratigraphies et renouvelle les preuves scientifiques dans l'analyse des œuvres d'art. Appliquées à l'emblématique tableau de *La Joconde* de Léonard de Vinci, ces techniques ont permis de révéler des dessins antérieurs inconnus, sans lien avec le portrait, ainsi que cinq découvertes majeures sur la technique exécutive du maître : l'usage des glacis pour façonner le célèbre *sfumato*, l'application des doigts pour adoucir et dégrader les nuances, l'emploi des hachures pour ombrer certaines retouches, le recours au grattage pour corriger d'anciennes compositions, et la technique du *spolvero*. En définitive, cette thèse montre que la combinaison d'une instrumentation avancée et de la méthode L.A.M. constitue une véritable contribution à la recherche en sciences de l'image et en études patrimoniales. Elle offre des éclairages inédits sur le processus créatif de Léonard de Vinci et ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse, la préservation et la valorisation du patrimoine artistique mondial.

## Academic abstract

This dissertation explores multispectral imaging for the scientific study of paintings, with a particular focus on Leonardo da Vinci's *Mona Lisa*. It presents the development of an original 240-megapixel multispectral camera combined with a collimated lighting system, designed to optimize spectral accuracy, reduce surface reflections, and enhance measurement dynamics.
Beyond instrumentation, this work introduces the Layer Amplification Method (L.A.M.), a scientific imaging technique that amplifies hidden signals within pictorial layers, usually inaccessible to infrared or radiographic methods. This approach constitutes an epistemological shift: it redefines the conditions of visibility of pictorial layers and renews the forms of scientific evidence in the analysis of artworks.
Applied to the iconic *Mona Lisa*, these techniques revealed previously unknown underlying drawings unrelated to the portrait, as well as five major discoveries about Leonardo's painting technique: the use of glazes to shape the famous *sfumato*, the application of fingers to soften and blend nuances, the use of hatching to shade certain retouches, the practice of scraping to modify earlier compositions, and the *spolvero* transfer technique.
Ultimately, this dissertation demonstrates that the combination of advanced instrumentation and the L.A.M. method constitutes a genuine contribution to research in imaging science and heritage studies. It provides new insights into Leonardo's creative process and opens new perspectives for the analysis, preservation, and valorization of the world's artistic heritage.

## Abstract accademico

Questa tesi esplora l'imaging multispettrale per lo studio scientifico delle pitture, con particolare attenzione alla *Gioconda* di Leonardo da Vinci. Presenta lo sviluppo di una camera multispettrale originale da 240 megapixel, associata a un sistema di illuminazione collimata, progettato per ottimizzare la precisione spettrale, ridurre i riflessi superficiali e aumentare la dinamica delle misurazioni.
Oltre all'apparato strumentale, questo lavoro introduce la *Layer Amplification Method* (L.A.M.), una tecnica di imaging scientifico che amplifica i segnali nascosti negli strati pittorici, normalmente inaccessibili ai metodi infrarossi o radiografici. Questo approccio rappresenta un vero spostamento epistemologico: ridefinisce le condizioni di visibilità delle stratigrafie e rinnova le forme di prova scientifica nell'analisi delle opere d'arte.
Applicate all'emblematico dipinto della *Gioconda*, queste tecniche hanno permesso di rivelare disegni sottostanti finora sconosciuti, senza rapporto con il ritratto, nonché cinque scoperte fondamentali sulla tecnica esecutiva del maestro: l'uso delle velature per modellare il celebre sfumato, l'applicazione delle dita per ammorbidire e sfumare le tonalità, l'impiego dei tratteggi per ombreggiare alcuni ritocchi, il ricorso alla raschiatura per correggere composizioni precedenti e la tecnica dello spolvero.
In definitiva, questa tesi dimostra che la combinazione di una strumentazione avanzata e del metodo L.A.M. costituisce un autentico contributo alla ricerca nelle scienze dell'immagine e negli studi sul patrimonio. Offre nuove prospettive sul processo creativo di Leonardo da Vinci e apre vie inedite per l'analisi, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio artistico mondiale.

# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur Lionel Simonot, Maître de Conférences Université Claude Bernard Lyon 1, Institut Lumière Matière, UMR CNRS 5306, HDR et directeur-adjoint du GDR CNRS 2044 APPAMAT, pour son accompagnement précieux tout au long de cette démarche doctorale singulière. Sa disponibilité, la pertinence de ses conseils et son engagement ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à Monsieur Daniel Meneveaux, Professeur des Universités à l'Université de Poitiers, Institut de recherche XLIM, UMR CNRS n°7252, pour avoir accepté avec une grande bienveillance d'assurer la fonction de référent dans les dernières étapes de cette thèse. Sa réactivité exemplaire a permis la poursuite sereine de ce processus dans des délais particulièrement contraints.

Je remercie enfin Monsieur Philippe Carré, Professeur des Universités et Vice-Président Recherche de l'Université de Poitiers, pour son soutien et pour avoir veillé à ce que cette soutenance s'inscrive pleinement dans le cadre académique de l'institution, ainsi que Monsieur Christophe Coupeau, Professeur des Universités et Directeur de l'École Doctorale MIMME, pour l'attention portée à mon parcours.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance aux Directeurs du *Dipartimento di Beni Culturali dell'Università di Bologna*, le *Professor* Luigi Tomassini, le *Professor* Luigi Canetti, et la *Professoressa* Anna Chiara Fariselli pour m'avoir accueilli successivement sans réserve durant ces neuf dernières années au sein de leur centre d'études et de recherches, me permettant un accès illimité à toutes les instrumentations. Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à la *Professoressa* Maria-Angela Vandini, la *Professoressa* Barbara Ghelfi et la *Doctoressa* Chiara Matteucci, responsables du *Laboratorio diagnostico per i Beni Culturali dell'Università di Bologna*, pour m'avoir donné un accès complet à leurs bases de données scientifiques de peintures, fruit de nombreuses années de recherches approfondies sur les pigments, les préparations, les études scientifiques, les coupes stratigraphiques de peintures, ainsi que sur de multiples publications. La spécialisation du laboratoire dans l'étude des œuvres des élèves, apprentis, membres de l'atelier, de l'Académie et des suiveurs de Léonard de Vinci en fait à la fois une référence et la base de données mondiale pour la recherche sur le plus grand maître de la Renaissance italienne. Ce soutien a été un atout inestimable pour mes travaux de recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au musée du Louvre, et en particulier à Monsieur Henri Loyrette, alors Président, ainsi qu'à Monsieur Vincent Pomarède, alors Conservateur Général en Chef des Peintures, pour avoir sollicité en octobre 2004 la numérisation multispectrale de *La Joconde* et de *La Belle Ferronnière*. Leur soutien a été fondamental à la concrétisation de cette recherche.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à Son Altesse le Prince Adam Karol Czartoryski, qui m'a fait l'honneur de m'inviter, en 2007, au Musée Czartoryski de Cracovie pour réaliser la numérisation multispectrale de *La Dame à l'hermine*. Ce moment privilégié a marqué une étape importante de mon parcours scientifique et humain.

Je souhaite également remercier la Professeure Mady Elias, physicienne de renom et responsable du département des nanosciences au CNRS de Bousicaut-Paris, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et pour ses enseignements inestimables sur la lumière et ses interactions avec les peintures. Grâce à elle, j'ai pu faire la numérisation d'œuvres d'exception au Musée Van Gogh - Kröller-Müller. Je lui suis

également profondément reconnaissant pour l'honneur qu'elle m'a fait en co-signant plusieurs publications rapportées dans cette thèse.

Je remercie chaleureusement le Professeur Jean-Marc Frigerio, Sorbonne UPMC, pour ses conseils avisés et son soutien.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Jean-Louis Meyzonnette, Professeur émérite de l'Institut d'Optique *Graduate School*, pour son apport inestimable. Ses recommandations bibliographiques, ses encouragements et ses conseils avisés m'ont permis de surmonter de nombreux défis techniques dans le cadre de cette étude.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Jean-Pierre Mohen, alors directeur du laboratoire des Musées de France, pour avoir encouragé la participation de ses collaborateurs au programme européen CRISATEL et pour m'avoir ouvert les portes de son laboratoire, pour la numérisation de *La Joconde*.

Je tiens également à remercier Monsieur Jean Penicaut, qui dès 2005, a cru en l'avenir de cette technologie et a permis la numérisation d'un grand nombre d'œuvres dans des musées prestigieux tels que le Musée Royal des Beaux-Arts de Bruxelles, le Cleveland Museum of Art aux États-Unis, le musée des Beaux-Arts de Rouen, le Musée Capodimonte de Naples, le Musée Van Gogh à Amsterdam, le Musée Czartoryski de Cracovie avec des signatures emblématiques telles que Gauguin, Manet, Monet, Van Gogh, Géricault, El Greco, Corot, Bruegel, Beato Angelico, Goya, Holbein, Crivelli et Vinci pour ne citer que quelques-uns.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à l'équipe d'ingénieurs de Lumière Technology : Damien Dupraz ingénieur et spécialiste couleur, Marcel Dupouy, ingénieur mécanicien, Thierry Hierso, ingénieur en électronique, Hervé Macudzinski, et Maximilien Roi, ingénieurs logiciels, pour leur expertise, leur engagement et leur soutien tout au long de cette aventure scientifique.

Pour l'étude des glacis il convient de remercier Chuck Siewert, spécialiste du transfert radiatif à la North Carolina State University ; René de la Rie, responsable de la recherche scientifique à la National Gallery of Art de Washington, D.C. ; et Yves Borensztein de l'Institut des NanoSciences de Paris pour leur intérêt dans le sujet et leur relecture constructive de la publication sur la démonstration des glacis.

Mes remerciements vont également à l'équipe administrative de l'Université de Poitiers, et plus particulièrement à Madame Carole Thenaud, pour son professionnalisme et son soutien précieux, qui ont grandement facilité le bon déroulement de cette démarche.

*À la mémoire de mon ami et collaborateur*
*le Dott. Salvatore Andrea Apicella,*
*dont le soutien et l'amitié accompagnent ces pages.*

# Classement bibliométrique des publications de Pascal Cotte

**Revues classées SCImago (par ordre décroissant de qualité)**

| Revue | SJR (2024) | Quartile | h-index | Commentaire |
|---|---|---|---|---|
| Journal of Cultural Heritage (Elsevier) | 0.726 | Q1 | 91 | Revue de référence dans la conservation et le patrimoine. IF ~3.3–3.8. |
| Applied Optics (Optica Publishing Group) | 0.451 | Q2 | 224 | Revue majeure en optique appliquée et instrumentation. |
| Archive for History of Exact Sciences (Springer) | 0.247 | Q2 | 29 | Revue historique et épistémologique en histoire des sciences. |

**Articles publiés dans des revues classées**

| Référence | Support | Ranking SCImago |
|---|---|---|
| P. Cotte, L. Simonot, *Mona Lisa's spolvero revealed*, J. Cultural Heritage, 2020. | Revue internationale | SJR 0.726 – Q1 – h91 |
| M. Elias, N. Mas, P. Cotte, *Review of optical analyses*..., J. Cultural Heritage, 2011. | Revue internationale | SJR 0.726 – Q1 – h91 |
| M. Elias, P. Cotte, *Multispectral camera*..., Applied Optics, 2008. | Optique appliquée | SJR 0.451 – Q2 – h224 |
| V. Gysembergh, A. Jones, E. Zingg, P. Cotte et al., *Ptolemy's treatise*..., Arch. Hist. Exact Sci., 2023. | Histoire des sciences | SJR 0.247 – Q2 – h29 |

**Actes de conférences avec publications**

| Référence | Conférence / éditeur | Données SCImago |
|---|---|---|
| P. Cotte, D. Dupraz, *Spectral imaging... true color smile*, IS&T CGIV'06, Leeds. | CGIV Series (IS&T) | SJR ≈ 0.17 – h10 |
| P. Cotte, D. Dupraz, *Spectral imaging... IR data*, IS&T Archiving'06, Ottawa. | IS&T Archiving | SJR ≈ 0.10 – h5 |
| F. Schmitt, P. Cotte et al., *CRISATEL Multispectral Imaging System*, AIC'05, Granada. | AIC Proceedings | Non indexé |
| P. Cotte, M. Dupouy, *CRISATEL high-resolution multispectral system*, PICS'03, Rochester. | IS&T PICS Conf. | Non indexé |

**Autres Publications non classables**

| Référence | Type de support | Commentaire |
|---|---|---|
| Marcotte, Cotte, Cohen-Skalli, *Relecture du palimpseste de Strabon*, Vatican Library Review, 2022. | Revue institutionnelle | Non indexée |
| Cotte, *Authenticating Artworks..., in Verità e menzogna nel falso*, Bononia UP, 2018. | Chapitre d'ouvrage | Pas de SJR |
| Elias, Cotte, *Composition of Leonardo's sfumato*..., EPS Rome 2012. | Résumé conférence | Non indexé |
| Cotte, *New knowledge is born...,* Int. Preservation News, 2010. | Revue professionnelle (IFLA) | Non classée |
| Elias & Cotte, *La Joconde analysée*..., Techniques de l'ingénieur, 2010. | Revue technique | Non indexée |
| Cotte, *CRISATEL digital camera*, Digitcult e-culture, 2003. | Magazine européen | Non indexée |
| Cotte, *Exploitation de la caméra multispectrale*..., IST2-1999, 2002–2004. | Rapports européens | Non indexée |

# Éthique, déontologie, droit, propriété et usages des images et datas scientifiques

Cette thèse portant sur le traitement d'images d'œuvres d'art, la question de l'éthique liée à l'usage de ces images s'est posée à plusieurs reprises, en résonance avec mes réflexions de ces dernières années.

La numérisation scientifique des œuvres d'art, notamment par des dispositifs d'imagerie avancée tels que les caméras multispectrales, soulève une série de questions juridiques, déontologiques et éthiques. Afin de poser clairement les enjeux, il convient d'abord de définir les concepts fondamentaux qui structurent cette réflexion : le droit, la déontologie, l'éthique, la photographie, le droit moral, et le droit sur les données.

Le droit : désigne l'ensemble des règles juridiques opposables, issues de la loi ou de la jurisprudence, qui régissent les relations entre individus ou institutions. Il se divise ici en plusieurs branches : droit d'auteur, droit de la propriété, droit du travail, etc.

La déontologie : est l'ensemble des règles et devoirs propres à une profession ou un secteur d'activité. Contrairement au droit, elle n'est pas toujours codifiée légalement, mais elle joue un rôle normatif fort dans l'encadrement des pratiques professionnelles (respect de la hiérarchie, du protocole, etc.).

L'éthique : relève d'une réflexion morale, philosophique et contextuelle sur ce qui est juste, responsable ou souhaitable.

La photographie : inclut toute captation d'image résultant de choix techniques ou esthétiques. En droit, une photographie peut être protégée au titre du droit d'auteur si elle manifeste une originalité dans son traitement.

Le droit moral : est une composante du droit d'auteur. Il est perpétuel, inaliénable et imprescriptible.

Le droit sur les données : couvre les droits attachés aux mesures scientifiques, métadonnées, résultats expérimentaux ou analytiques.

## Application à la pratique scientifique

Dans le cadre de la numérisation scientifique des œuvres d'art, la légitimité des actes posés repose non seulement sur le droit, mais également sur une éthique rigoureuse, intégrant les principes de la déontologie du chercheur et une attention particulière aux responsabilités liées à la manipulation d'objets patrimoniaux.

**Œuvres appartenant à des collectionneurs privés :**

Une règle stricte de confidentialité est appliquée, étendue jusqu'au simple fait que l'œuvre ait été examinée. Les rapports d'analyse, les images produites et les données recueillies ne sont jamais partagés sans un accord explicite, écrit, du propriétaire. Lorsque l'étude est menée dans le cadre d'un engagement formel avec ce dernier, il en est le seul destinataire légitime et dispose d'un droit exclusif

d'usage, ou d'existence du rapport. Le chercheur en reste l'auteur et conserve la pleine propriété intellectuelle du document au titre du droit d'auteur, sans que ce droit ne soit transféré.

**Œuvres du domaine public conservées en musées :**

Il est possible de mentionner publiquement qu'une œuvre a été numérisée ou étudiée, dans un cadre scientifique ou de communication, mais aucune image ni donnée ne sont publiées sans l'accord formel de l'institution. Lorsque l'œuvre appartient au domaine public mais que les droits patrimoniaux de l'auteur ne sont pas encore échus, l'utilisation des données est interdite sans autorisation des ayants droit.
Cette diversité des cas peut être résumée dans le tableau suivant :

| Situation | Droits concernés | Comment les encadrer ? |
|---|---|---|
| Œuvre d'un artiste vivant ou mort depuis <70 ans | Droit d'auteur + droit moral | Demander l'autorisation des ayants droit |
| Œuvre dans le domaine public | Droit moral seulement | Mentionner l'auteur, respecter l'intégrité |
| Image technique (spectre, radiographie, fluorescence, etc) | Données scientifiques | Protéger par secret ou base de données |
| Image traitée (LAM, etc.) | Droit d'auteur potentiel | Valoriser l'apport créatif |
| Travail gratuit sur demande | Droit d'auteur + droit sur les données | Clauses écrites sur la réutilisation |

## Cas de figures

**Intermédiaire technique et autorité décisionnelle distincte**
Dans certaines situations, l'œuvre est confiée à l'analyse scientifique par le collectionneur lui-même, mais les choix techniques quant aux investigations à mener sont orientés par un tiers - souvent un expert, un Art Advisor, un galeriste ou un commissaire-priseur. Ce tiers, bien que n'étant pas propriétaire de l'œuvre, dispose d'une légitimité professionnelle pour déterminer la nature des examens utiles à l'étude du tableau, notamment dans une perspective d'authentification ou de valorisation.

Dans ce cas, il est d'usage de transmettre les données et le rapport exclusivement au collectionneur, seul détenteur des droits sur l'œuvre. Il lui appartient alors de communiquer les résultats à son conseil, en toute autonomie. Cette pratique repose sur un double principe : d'une part, la stricte confidentialité envers le commanditaire direct, et d'autre part, le respect des prérogatives du conseil, auquel revient l'interprétation finale dans le cadre d'un processus expert.

**Tiers et autorisation du propriétaire**
Dans d'autres cas, c'est le conseil - ou un futur acheteur - lui-même qui prend en charge l'étude, sans être le propriétaire de l'œuvre. Afin de préserver l'intégrité du processus, une autorisation écrite du collectionneur est alors systématiquement requise, attestant qu'il donne son accord pour la réalisation d'investigations scientifiques. Cette formalité garantit que l'intervention est pleinement consentie par la personne légalement habilitée à engager l'analyse d'une œuvre d'art.

En l'absence d'un écrit formel, la remise directe de l'œuvre par le collectionneur peut être interprétée comme une acceptation tacite de la réalisation de l'étude. Toutefois, lorsque la demande d'analyse est formulée par un tiers - tel qu'un conseil ou un expert - le rapport est transmis exclusivement à ce tiers, conformément à la logique de l'engagement initial. Cette disposition ne remet nullement en cause les droits du collectionneur sur l'œuvre, mais répond à une exigence de cohérence dans la commande, de clarté dans la communication des résultats, et de respect des engagements de confidentialité.

**Propriété partagée et indivision familiale**

Certaines œuvres étudiées relèvent d'une copropriété familiale, notamment dans le cas d'une fratrie. Il peut arriver qu'un seul membre de la fratrie sollicite une étude scientifique sans qu'un accord explicite ait été formulé par les autres ayants droit. Dans ce contexte, la question de la légitimité à engager une analyse scientifique et à recevoir les résultats impose une grande prudence.

La règle adoptée consiste à demander une autorisation écrite de l'ensemble des co-propriétaires, dès lors qu'il est établi que l'œuvre est détenue en indivision. En l'absence d'une telle mention, et sauf indication contraire, le rapport d'analyse est communiqué uniquement au(x) membre(s) de la fratrie ayant personnellement sollicité l'étude, et qui assument explicitement la responsabilité de cette démarche au nom de la copropriété.

**Contenu des rapports d'analyse**

Dans tous les cas, et de manière plus générale, les rapports produits suivent une **déontologie strictement scientifique**. La solution retenue est de **se limiter à une analyse technique neutre**, sans émettre de jugement sur le statut juridique, la valeur marchande ou l'authenticité de l'œuvre - ni dans un sens ni dans l'autre. Cette posture garantit à la fois la rigueur académique et le respect des limites de compétence du chercheur. Le chercheur ne produit pas d'expertise.

Le contenu des rapports est structuré selon les éléments suivants :

- des données d'imagerie technique (spectre visible, infrarouge, ultraviolet, multispectral, rayons X, etc.) ;
- des résultats d'analyse des matériaux (pigments, liants, vernis, etc.) ;
- des observations sur la technique picturale (stratigraphie, repentirs, exécution, etc.) ;
- des éléments de contextualisation iconographique, stylistique et historiographique, lorsque ceux-ci peuvent être étayés objectivement.

Cette neutralité méthodologique permet de **préserver une position scientifique rigoureuse**, sans interférer dans des enjeux successoraux, juridiques ou commerciaux. Elle garantit aussi que **les données produites puissent être réexploitées** ultérieurement dans un cadre consensuel, si le propriétaire ou les co-propriétaires expriment un intérêt commun pour une interprétation ou une diffusion élargie des résultats. Le rapport aide, renforce et appuis un avis, il ouvre le dialogue avec l'Expert, le Conservateur, le Commissaire-Priseur, l'Historien de l'art sans se substituer à leur avis.

Les rapports s'appuient sur le protocole d'analyse et d'authentification des œuvres publié par le *Laboratorio Diagnostico del Dipartinento di Beni Culturali dell'Universita di Bologna*[1], la référence en la matière.

[1] https://site.unibo.it/laboratorio-diagnostico-dbc/it/best-practice-a-supporto-dell-autenticazione-di-dipinti

## Cas particulier de *La Joconde* :

L'utilisation de données multispectrales dans un cadre scientifique et académique implique des obligations éthiques, juridiques et déontologiques, qui imposent au chercheur le respect de la transparence, de la rigueur méthodologique et des droits afférents aux données exploitées. Dans le cas de *La Joconde*, les données ont été acquises dans le cadre d'une numérisation multispectrale effectuée à la demande explicite du musée du Louvre, détenteur de l'œuvre étudiée. Cette sollicitation émanait du musée et du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), en raison du fait que le chercheur et inventeur de la caméra était alors le seul opérateur en mesure de réaliser cette opération, disposant à la fois des compétences nécessaires et du prototype unique de caméra multispectrale. L'intervention, conduite le 19 octobre 2004, a été réalisée à titre purement gracieux, sur une base volontaire, sans contrepartie financière ni relation de sous-traitance, dans un objectif exclusivement scientifique.

La numérisation multispectrale de *La Joconde* ne relevait pas des actions définies, pour ce qui concerne le chercheur, dans le cadre du projet européen CRISATEL (FP5), au sein duquel les contributions étaient réparties en *work packages* distincts et contractuellement attribués. L'intervention était encadrée par un contrat de confidentialité qui stipulait l'obligation de remise d'une copie des données au musée/C2RMF ainsi que l'interdiction de toute diffusion ou publication autonome. Toutefois, un accord de confidentialité devient caduc dès lors que l'entité bénéficiaire du contrat publie elle-même les informations couvertes par cet accord. En l'occurrence, la publication officielle du Louvre/C2RMF en 2006 du livre *Au cœur de la Joconde*, incluant un chapitre sur la numérisation multispectrale, constitue juridiquement une levée de confidentialité. Ce point a été confirmé par la délivrance ultérieure, par le service juridique du musée du Louvre, d'une autorisation écrite (lettre du 26 juin 2006) autorisant expressément l'exploitation des données, y compris dans des contextes non exclusivement académiques.

Cependant, cette autorisation ne mentionne pas explicitement le droit de divulguer ou de mettre à disposition les données brutes. En l'absence d'une telle clause, et par mesure de prudence déontologique, aucune diffusion publique des données intégrales n'a été effectuée. L'usage des données dans le cadre de la présente thèse, à des fins strictement scientifiques, s'inscrit donc pleinement dans le cadre légal et contractuel. Seules sont présentées des images illustratives et des traitements issus de l'analyse, utilisés pour étayer l'argumentation scientifique. Toute demande d'accès aux données complètes doit être adressée directement au musée, qui reste seul décisionnaire quant aux modalités et à l'opportunité d'une éventuelle diffusion. Néanmoins, en l'absence de cession explicite des droits afférents à leur production, toute réutilisation par un tiers requiert l'accord préalable de l'auteur, en sa qualité de producteur des données. Cette exigence garantit le respect des droits intellectuels et la conformité des usages.

Le cadre juridique applicable est celui du droit français, qui reconnaît aux établissements publics de conservation la responsabilité de gestion, de reproduction et de communication des œuvres dont ils ont la garde, y compris pour les captations techniques ou scientifiques. En ce sens, la question de l'ouverture des données ne relève pas du chercheur mais de l'institution patrimoniale concernée.

Enfin, l'ensemble du travail repose sur les principes fondamentaux de la recherche responsable : intégrité scientifique, respect des engagements contractuels, attribution rigoureuse des sources, et responsabilité éthique. Ces principes s'inscrivent dans les chartes internationales de référence telles que le Code de déontologie du CNRS et le *European Code of Conduct for Research Integrity* (ALLEA, 2017). Aucune entité ou personne n'a été omise, et aucun élément n'a été exploité en dehors de sa finalité ou des autorisations obtenues.

## À propos de l'usage des données numériques sur *La Joconde*

La liberté de la recherche constitue un principe fondamental dans l'étude des œuvres d'art. *La Joconde*, propriété de l'État français et conservée au musée du Louvre, appartient au domaine public. Cette liberté implique que toute personne - chercheur académique, scientifique ou amateur éclairé - puisse accéder aux données relatives à l'œuvre pour en approfondir l'analyse et enrichir la connaissance collective.

Garantir cette liberté est essentiel à l'évolution des savoirs. Chaque nouvelle approche, chaque avancée technologique permet de renouveler notre compréhension du tableau, révélant des éléments inédits et affinant l'interprétation des techniques de Léonard de Vinci. L'ouverture des données scientifiques favorise le pluralisme intellectuel, indispensable au progrès. Si leur usage était restreint, seules quelques voix auraient le pouvoir d'orienter l'interprétation et la perception de l'œuvre, quitte à s'enfermer dans une hypothèse dominante, potentiellement figée, au détriment d'une vision enrichie par les outils contemporains.

Ne pas tenir compte des données scientifiques, c'est figer le débat et freiner l'émergence de nouvelles perspectives, pourtant essentielles à la recherche, comme le démontre la présente thèse à travers de nombreuses découvertes. Ces résultats, produits grâce à une méthode rigoureuse et à des outils d'imagerie avancés, ouvrent de nouveaux champs d'interprétation, tant du point de vue technique qu'historiographique.

Il est manifeste que le musée du Louvre, en autorisant cette opération de numérisation multispectrale, a reconnu la légitimité scientifique de la démarche et la valeur potentielle des résultats. En offrant la possibilité d'exercer des compétences nouvelles dans ce contexte exceptionnel, l'institution s'est inscrite dans cette logique d'ouverture, tout en mesurant sans doute la complexité d'un tel choix, à la croisée des enjeux patrimoniaux, scientifiques et symboliques.

Pour autant, il serait illusoire d'ignorer que la diffusion incontrôlée de données aussi sensibles, portant sur une œuvre aussi emblématique, comporte des risques. Il est légitime qu'une institution publique s'assure que ces données ne puissent être instrumentalisées ou mal interprétées. Mettre des données techniques de haute précision entre toutes les mains, sans cadre ni accompagnement, pourrait fragiliser leur portée scientifique et altérer leur réception. L'ouverture des données ne peut être dissociée de la responsabilité de leur usage. Un équilibre est donc nécessaire entre accessibilité et protection raisonnée, afin de garantir un usage éclairé, éthique et constructif.

Une œuvre telle que *La Joconde*, dont la richesse et la complexité continuent de susciter interrogations et découvertes, ne saurait être réduite à une unique lecture dictée par un cercle restreint. L'usage ouvert, documenté et responsable des données scientifiques constitue l'un des leviers essentiels pour faire vivre cette œuvre dans l'espace public du savoir.

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS ..... iii

Éthique, déontologie, droit, propriété et usages des images et datas scientifiques ..... vi

TABLE DES ILLUSTRATIONS ..... xv

INDEX DES TABLEAUX ..... xxi

INTRODUCTION DE LA THESE ..... 1

1 CHAPITRE 1 - Problématique du *spolvero* sur *La Joconde* - *Impulsus ad methodum*. ..... 8

**Introduction** ..... **8**

**1.1 Le *spolvero* : principes et enjeux** ..... **8**

**1.2 Les obstacles contemporains à la détection des *spolveri*** ..... **11**

**1.3 Limites des techniques d'imagerie traditionnelles** ..... **12**

1.3.1 Usage et limites de la réflectographie infrarouge dans l'analyse des œuvres d'art ..... 13

1.3.2 La réflectographie infrarouge fausse couleur (IRFC). ..... 18

1.3.3 Radiographie par rayons X ..... 19

1.3.4 Émissiographie X ..... 21

1.3.5 Fluorescence ultraviolet (FUV) ..... 22

1.3.6 Hyperspectral ..... 23

**1.4 Mise en œuvre de la méthode L.A.M. premières découvertes des *spolveri*** ..... **23**

1.4.1 Première découverte des *spolveri* de *La Joconde* ..... 24

1.4.2 *Spolvero* sur le front de *La Joconde* avec les images L.A.M. ..... 24

1.4.3 Le *spolvero* entre les mains de *La Joconde* ..... 26

1.4.4 Autres *spolveri* retrouvés ..... 27

**1.5 Interprétation historique et stylistique** ..... **29**

**Conclusion** ..... **30**

2 CHAPITRE 2 - Développement d'une caméra multispectrale et d'un éclairage collimaté, numérisation de *La Joconde* ..... 32

**Introduction** ..... **32**

**2.1 Positionnement par rapport à l'état de l'art avant 2004** ..... **33**

**2.2 Cahier des charges de la caméra multispectrale** ..... **38**

**2.3 Développement de la caméra multispectrale** ..... **41**

**2.4 La caméra multispectrale, architecture : capteurs, filtres, optiques** ..... **43**

2.4.1 Le capteur CCD ..... 44

2.4.2 L'optique, une distorsion géométrique minimum ..... 45

2.4.3 Les filtres ..... 45

2.4.4 La mécanique ..... 46

**2.5 Un éclairage intégré spécifique** ..... **47**

2.5.1 Quantité de lumière projeté sur les plans de numérisation ..... 48

2.5.2 Conception optique du miroir réflecteur des projecteurs ..... 48

2.5.3 La motorisation et la synchronisation des projecteurs ..... 49

**2.6 Reconstruction des images ..... 50**

**2.7 État de l'art des caméras multispectrales après 2004 et évolutions ..... 51**

**2.8 La numérisation multispectrale de *La Joconde* ..... 55**

2.8.1 Installation de la caméra multispectrale ..... 55
2.8.2 Contrôle de l'exposition ..... 57
2.8.3 Réglages de la caméra et calibrage ..... 59
2.8.4 Acquisition des images ..... 60
2.8.5 Traitements des données d'acquisition ..... 61

**Conclusion ..... 62**

3 CHAPITRE 3 - La méthode L.A.M. : formulation et validation sur *La Joconde* ..... 64

**Introduction ..... 64**

**3.1 Les traitements d'images et les images L.A.M. ..... 65**

3.1.1 Techniques traditionnelles de traitements d'images multispectrales - état de l'art ..... 65
3.1.2 Principes de la méthode L.A.M. ..... 67
3.1.3 Les calculs $L.A.M.$ ..... 70
3.1.4 Amplifier les images L.A.M. ..... 74

**3.2 Illustration du principe de la méthode L.A.M. ..... 76**

**3.3 Exemples ..... 80**

**3.4 1ère validation de la méthode L.A.M. pour la recherche du *spolvero* ..... 84**

**3.5 2ème validation de la méthode L.A.M. : Étude expérimentale d'une superposition picturale simulée ..... 88**

**Conclusion ..... 91**

4 CHAPITRE 4 - Conditions expérimentales d'efficacité de la méthode L.A.M. ..... 94

**Introduction ..... 94**

**4.1 Exploitation de l'angle d'incidence avec une lumière collimatée oblique ..... 95**

**4.2 Saturation et clarté selon la configuration d'éclairage ..... 97**

**4.3 Netteté selon la configuration d'éclairage ..... 101**

**4.4 Impacte sur la diffusion sous-surfacique ..... 103**

**4.5 Application de l'éclairage collimatée à l'angle de Brewster sur *La Joconde* ..... 105**

**Conclusion ..... 106**

5 CHAPITRE 5 - *La Joconde* : caractérisation scientifique de la technique exécutive ..... 110

**Introduction ..... 110**

**5.1 Technique exécutive connue en 2004 avant la numérisation multispectrale ..... 112**

5.1.1 Les images scientifiques de laboratoire en 2004, analyses ..... 114

**5.2 Analyse des craquelures ..... 114**

5.2.1 Le phénomène des craquelures ..... 116
5.2.2 Les craquelures sur *La Joconde* ..... 117

**5.3 Le dévernissage virtuel de *La Joconde* ..... 119**

5.3.1 Dévernissage par méthode pseudo-inverse ..... 120

5.3.2 Élaboration de la base de données de pigments pour le dévernissage virtuel ..... 121

**5.4 Identification des pigments, méthodes, état de l'art ..... 125**
5.4.1 Identification des mélanges de pigments sur *La Joconde* avec la caméra multispectrale ..... 126
5.4.2 Les matériaux de *La Joconde* et de Léonard de Vinci ..... 127
5.4.3 Construction de la carte des points de mesures sur *La Joconde* ..... 128
5.4.4 Les méthodes pour identifier les pigments à l'aide de la spectrophotométrie ..... 131
5.4.5 Le travail d'identifications et de vérifications avec le logiciel de formulation ..... 135
5.4.6 Comparaison avec les autres méthodes d'analyse ..... 140
5.4.7 Discussion ..... 141

**5.5 Les glacis sur *La Joconde* ..... 146**

**5.6 Autres dessins préparatoires sur *La Joconde* ..... 156**

**5.7 Autres techniques picturales ..... 157**
5.7.1 Les croix dans les yeux ..... 157
5.7.2 L'usage des doigts de l'artiste ..... 158
5.7.3 La méthode de grattage ..... 161
5.7.4 Les hachures de reprises ..... 163

**5.8 Autres repeints et repentirs ..... 165**
5.8.1 Un projet de coiffe de Madone ? ..... 165
5.8.2 La robe Florentine de Lisa Gherardini ..... 169

**Conclusion ..... 172**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ..... 174

BIBLIOGRAPHIE ..... A

ANNEXE - Images L.A.M. de *La Joconde* ..... L

6 SUPPLEMENTS ..... - 2 -

**6.1 La caméra multispectrale ..... - 2 -**
6.1.1 Le capteur CCD ..... - 2 -
6.1.2 L'optique, une distorsion géométrique minimum ..... - 7 -
6.1.3 Le pouvoir séparateur ..... - 9 -
6.1.4 Les filtres ..... - 14 -
6.1.5 La mécanique ..... - 22 -

**6.2 Dispositif d'éclairage ..... - 24 -**
6.2.1 Caractéristiques d'une source de lumière ..... - 24 -
6.2.2 Conception optique du miroir réflecteur des projecteurs ..... - 25 -
6.2.3 La motorisation et la synchronisation des projecteurs ..... - 27 -
6.2.4 Programme de recherche sur les sources de lumière et leur mise en œuvre ..... - 28 -
6.2.5 Mise en œuvre des lampes à décharges HQI/HCI et HID. ..... - 29 -
6.2.6 Les lampes au xénon à décharge HID ..... - 32 -
6.2.7 Synthèse d'analyse des sources de lumière ..... - 34 -

**6.3 Installation et calibration de la caméra ..... - 35 -**
6.3.1 Installation des équipements ..... - 35 -
6.3.2 Réglages des focus et synchronisation des lampes ..... - 36 -
6.3.3 Réglages des gains et temps d'exposition ..... - 36 -
6.3.4 Évaluations des qualités numériques et visuelles de la caméra ..... - 36 -
6.3.5 Équation générale de correction du pixel ..... - 38 -

*6.3.6 Flatfied* ..... - 39 -

**6.4 Numérisation et normalisation des images ..... - 42 -**
6.4.1 Numérisation des tableaux ..... - 42 -
6.4.2 Correction de blanc ..... - 42 -
6.4.3 Registration des images ..... - 43 -

**6.5 Reconstruction des courbes spectrales de réflectance ..... - 44 -**
6.5.1 État de l'art des méthodes de reconstruction de spectres à partir de données discrètes ..... - 45 -
6.5.2 La méthode PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) ..... - 47 -

**6.6 La reconstruction des images couleur ..... - 51 -**
6.6.1 Le système CIE 1931 XYZ ..... - 51 -
6.6.2 Les illuminants ..... - 53 -
6.6.3 L'espace couleur CIE 1976 L*a*b et le modèle d'apparence couleur ..... - 54 -
6.6.4 Vers une meilleure estimation perceptive des écarts colorimétriques : $\Delta E_{94}$ et $\Delta E_{00}$ ..... - 57 -

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## Introduction


Figure 1 - Premiere gravure de La Joconde vers 1651 ..... 1
Figure 2 - Étude des ombres - Leonard de Vinci - Ital. 2028 Manuscrit 2185 16r (foliote 14) -Bibl. de l'Institut ..... 1
Figure 3 - Étude d'un tableau au laboratoire des musees de France - 1961 ..... 2
Figure 4 - Infrarouge (←) © P. Cotte et rayon X de La Joconde (→)© Musee du Louvre ..... 2
Figure 5 - Multispectral de La Joconde ..... 3
Figure 6 - Systeme multispectrale de la National Gallery 1993 (←) ..... 4
Figure 7 - Prototype (1999) camera multispectrale 13 filtres 240 MP invention 1997, decrite dans cette these (→) ... 4


## Chapitre 1


Figure 8 - Leonard de Vinci. (Vinci, 1452 - Amboise, 1519) Portrait d'Isabelle d'Este, vers 1499-1500 ..... 10
Figure 9 - Processus de realisation du spolvero ..... 10
Figure 10 - Decouverte du spolvero sur le Salvator Mundi dite version Ganay, huile sur bois, 68,3 x 48,9 cm, coll. Privee. Numerisee en multispectral en 2012 puis en 2020 apres restauration. Images L.A.M #18 d 12-8-1 et IR 1050 nm. ..... 11
Figure 11 - (a) Fluorescence U.V. ; (b) Emissiographie X ; (c) Rayons X © Louvre, c2rmf ..... 12
Figure 12 - (a) Fausse-couleur infrarouge ; (b) Infrarouge camera Vidicon 2000 nm; (c) Infrarouge Osiris 1700 nm © Louvre, c2rmf ..... 12
Figure 13 - Detail du front de La Joconde - image couleur D65, camera multispectrale. © P. Cotte ..... 15
Figure 14 - Detail de la tete, photographie NIR (900-1000 nm), capteur CCD © Louvre/c2rmf ..... 16
Figure 15 - Detail de la tete, reflectographie IR Vidicon (1800-2000 nm), camera Hamamatsu C2400-03 © Louvre/c2rmf ..... 16
Figure 16 - Detail de la tete, reflectographie infrarouge haute resolution (camera OSIRIS, 16 MP) © Louvre/c2rmf ..... 16
Figure 17 - Detail de la tete, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) a 800 nm © P. Cotte ..... 17
Figure 18 - Detail de la tete, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) a 900 nm © P. Cotte ..... 17
Figure 19 - Detail de la tete, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) a 1000 nm © P. Cotte ..... 17
Figure 20 - Detail de la tete, image en Fausse-couleur infrarouge © Louvre/c2rmf ..... 19
Figure 21 - Detail radiographique de la tete de La Joconde © Louvre/c2rmf ..... 20
Figure 22 - Detail de la tete, Émissiographie X. © Louvre/c2rmf ..... 21
Figure 23 - Detail de la tete, Image FUV. © Louvre/c2rmf ..... 22
Figure 24 - Emplacements des spolveri retrouves ..... 24
Figure 25 - Detail du front de La Joconde : **a**) Image couleur D65 ; **b**) Reflectographie infrarouge a 2000 nm. © Louvre, c2rmf ; **c**) Filtre NIR R900 de la camera multispectrale. © P. Cotte ; **d**) Image L.A.M. © P. Cotte ; **e**) - Image couleur D65 + contours du spolvero. © P. Cotte ..... 25
Figure 26 - Detail des mains de La Joconde : **a**) - Image couleur D65 ; **b**) - Reflectographie infrarouge a 2000 nm. © Louvre ; **c**) - Reflectance visible $R720$. © P. Cotte ; **d**) - Image L.A.M. © P. Cotte ; **e**) - Mesures de distances entre les points. © P. Cotte ..... 26
Figure 27 - Spolvero du contour superieur de la tete (3) © P. Cotte ..... 27
Figure 28 - Ce graphique de la distribution normalisee des distances mesurees entre les points de perçage des spolveri utilises pour transferer les dessins du Portrait d'Isabelle d'Este (en bleu) et de La Joconde (en orange). ..... 27
Figure 29 - Spolvero retrouve avec les images L.A.M. dans le ciel de La Joconde pour un projet coiffe (4) © P. Cotte ..... 28
Figure 30 - Les spolveri retrouve avec les images L.A.M. : ..... 28
Figure 31 - Les spolveri retrouve avec les images L.A.M. sur la broderie au bord du decollete (6) © P. Cotte ..... 28

## Chapitre 2


Figure 32 - Triangle de Mayer ..... 34
Figure 33 - Photographie couleur de Gabriel Lippman, sans pigment, utilisant les interferences lumineuses. Jardin du chateau de Versailles. ..... 34
Figure 34 - Illustration de la 1ERE camera multispectrale 6 filtres de 240 megapixels inventee 1997 (brevet 1998).... 43
Figure 35 - 1ere camera multispectrale 13 filtres ultra haute definition de 240 MP (1999) qui a numerise La Joconde ..... 43
Figure 36 -Camera multispectrale 13 filtres ultra haute definition de 240 MP modele de preserie (2005)..... 43
Figure 37 - Capteur CCD - TH-7834C en position dans la camera, fixe sur sa carte electronique de gestion. © P. Cotte ..... 44
Figure 38 - Optique Rodenstock 210 mm fixee sur la camera multispectrale. © P. Cotte..... 45
Figure 39 - Bandes passantes des 13 filtres - soft coating - epais. 7 mm utilises de 2001 a 2021 (<-)..... 46
Figure 40 - Detail de la mecanique interieure de la camera - deplacement du CCD © P. Cotte ..... 47
Figure 41 - Les projecteurs, equipes de miroirs monoblocs aluminium, sont positionnes symetriquement au plan de numerisation. Ils produisent une bande de lumiere collimatee etroite (ici, tungstene-halogene). ..... 49
Figure 42 - Hypercube de donnees multispectrales mesurees sur La Joconde © P. Cotte ..... 50
Figure 43 - Installation de la camera multispectrale devant La Joconde le 19 octobre 2004 ..... 56
Figure 44 - Pascal Cotte devant le panneau de La Joconde, sans son cadre de contention (←)..... 56
Figure 45 - La Joconde positionnee sur le chevalet (→)..... 56
Figure 46 - Plan d'installation de la camera et des projecteurs a l'angle de Brewster pour La Joconde publie en 2004 ..... 57
Figure 47 - Position de La Joconde par rapport a la bande lumineuse ..... 58
Figure 48 - Mesure de la temperature sur La Joconde pendant le balayage du faisceau lumineux..... 58
Figure 49 - (←) La Joconde, image totale (1) - Aire de la macrophotographie (2) @ P. Cotte..... 60
Figure 50 - (→) La camera multispectrale a 60 cm de La Joconde pour la macrophotographie @ P. Cotte ..... 60
Figure 51 - Les 13 images multispectrales et la reconstruction couleur pour un illuminant D65 @ P. Cotte ..... 61
Figure 52 - La Joconde - Image couleur D65 (←) et Fausse couleur infrarouge (→) © P. Cotte ..... 61


## Chapitre 3


Figure 53 - Representation schematique de la diffusion d'une lumiere incidente dans une couche picturale, ..... 68
Figure 54 - Illustration du calcul residuel applique dans la methode $L.A.M.res$ ..... 73
Figure 55 - Exemple d'image L.A.M. tres sombre, en sortie de calculs et son histogramme..... 74
Figure 56 - Exemple d'image L.A.M. apres etirement ou normalisation de l'histogramme de la Figure 55..... 75
Figure 57 - Exemple d'image L.A.M. apres egalisation de l'histogramme de la Figure 56 ..... 76
Figure 58 - Profils de reflectance $R\lambda 1$et $R\lambda 2$ et le differentiel $R\lambda 1 - R\lambda 2$ sans amplification. ..... 77
Figure 59 - Application d'un gain modere a la difference directe ( $R\lambda 1 - R\lambda 2$) x $A^{(i)}$ ..... 77
Figure 60 - Reduction du signal differentiel par mise a l'echelle radiometrique ($R\lambda 1 \times pcor - R\lambda 2$ ) au pixel 50..... 78
Figure 61 - Amplification du signal differentiel apres calage de la reflectance ($R\lambda 1 \times pcor - R\lambda 2$ ) x $A^{(ii)}$ ..... 78
Figure 62 - Reduction du signal differentiel par mise a l'echelle radiometrique $|R\lambda 1 \times pcor^{(2)} - R\lambda 2|$au pixel 125..... 79
Figure 63 - Amplification du signal differentiel absolu apres calage de la reflectance au pixel 125 : $|R\lambda 1 \times pcor^{(2)} - R\lambda 2|$ x $A^{(iii)}$ ..... 79
Figure 64 - Detail de La Joconde (21.3 x 16.8 mm), bord de la coiffure en haut a droite - (a) Vue en couleur D65 ..... 80
Figure 65 - Les images brutes 560 nm (a) et 800 nm (b) de la camera multispectrale du detail presente en Figure 64d, sont ici affichees avec un contraste exagere pour accentuer sa visibilite. ..... 80
Figure 66 - Representation schematique de la methode L.A.M. appliquee au detail du ciel de La Joconde Figure 65. .. 81
Figure 67 - Sequence d'images L.A.M. residuelles du visage de La Joconde. © P. Cotte ..... 82
Figure 68 - Sequence d'images L.A.M. soustractives des mains de La Joconde. © P. Cotte..... 83
Figure 69 - Realisation d'une planche de test a epaisseurs de blanc de plomb croissantes recouvrant des spolveri. ... 84
Figure 70 - Resultat de la planche de test avec blanc de plomb. ..... 85

FIGURE 71 - SPECTRES D'UN POINT NOIR (LIGNE BLEUE) ET DE LA ZONE BLANCHE (LIGNE ORANGE) ADJACENTE. MESURES EFFECTUEES SUR UNE ZONE NON RECOUVERTE DE BLANC DE PLOMB, ET SUR LES ZONES 10, 30, 40, 50, 60. ..... 86
FIGURE 72 - LEONARD DE VINCI - (VINCI, 1452 - AMBOISE, 1519) - LA DAME A L'HERMINE NOYER 55.5 X 45.5 CM - MUSEE CZARTORYSKI, CRACOVIE - HUILE SUR NOYER - DEVERNISSAGE VIRTUEL © P.COTTE ..... 87
FIGURE 73 - LEONARD DE VINCI - DETAIL DE LA TETE DE L'HERMINE - LA DAME A L'HERMINE © P. COTTE ..... 88
FIGURE 74 - MONICA CELESTE - ÉTUDE DE LA DAME A L'HERMINE BASEE SUR LES TRAVAUX DE PASCAL COTTE. HUILE SUR NOYER. 2024 ..... 88
FIGURE 75 - MONICA CELESTE - DETAIL DE L'HERMINE - (A) COUL. D65 MULTISPECTRALE - (B) I.R. 900 NM - (C) 1000 NM © MONICA CELESTE/P. COTTE POINT DE MESURE (ROUGE) POUR L'OPTIMISATION DE $pcor$. ..... 89
FIGURE 76 - MONICA CELESTE - DETAIL DE L'HERMINE - (A) I.R. 900 - 1000 - (B) I.R. 900 - 1000 + AMPLIFICATION © MONICA CELESTE/P. COTTE ..... 90
FIGURE 77 - COMPARAISON IMAGES (A/B) L.A.M. 0.79•900-1000 - MONICA CELESTE ET (C) IMAGE L.A.M. LEONARD DE VINCI. © P. COTTE ..... 90

## Chapitre 4

FIGURE 78 - REFLECTANCES DES LUMIERES POLARISEES A L'INTERFACE AIR/VERNIS. CONFIGURATION DE LA JOCONDE ..... 96
FIGURE 79 - MIRE SUR PAPIER JOURNAL (A GAUCHE) ..... 97
FIGURE 80 - MIRE LABORATORIO DIAGNOSTICO PER I BENI CULTURALI, UNIVERSITE DE BOLOGNE (A DROITE) ..... 97
FIGURE 81 - CONFIGURATION ① LES MIRES DE TEST SONT ECLAIREES PAR LA LUMIERE DES PROJECTEURS DIFFUSEE SUR LES PANNEAUX DE POLYSTYRENES (←) ..... 98
FIGURE 82 - CONFIGURATION ③ LES MIRES DE TEST SONT ECLAIREES PAR LA LUMIERE DES PROJECTEURS EQUIPES D'UN FILTRE POLARISANT. ..... 98
FIGURE 83 - CONFIGURATION ② UN FILTRE NEUTRE DE DENSITE 2 EST POSE L'OPTIQUE DE LA CAMERA POUR AVOIR UN FLUX COMPARABLE AVEC LA CONFIGURATION ③ AVEC FILTRE POLARISANT (←) ..... 99
FIGURE 84 - CONFIGURATION ② LES MIRES DE TEST SONT ECLAIREES DIRECTEMENT PAR LES RAYONS COLLIMATES DES PROJECTEURS INCIDENTS SUR LA MIRE AVEC UN ANGLE DE 56.5° (→) ..... 99
FIGURE 85 - CHROMA EN FONCTION DE LA CLARTE POUR LES MIRES PAPIER JOURNAL ET UNIBO ..... 100
FIGURE 86 - POINT LUMINEUX - OUTREMER, MIRE PAPIER JOURNAL, LUMIERE DIFFUSE ① (←) ..... 101
FIGURE 87 - POINT LUMINEUX - OUTREMER, MIRE PAPIER JOURNAL, LUMIERE COLLIMATEE A L'ANGLE DE BREWSTER ② (→) ..... 101
FIGURE 88 - PROFIL D'INTENSITE SUR LA COMPOSANTE L* (CIELAB D6), LUMIERE DIFFUSE. ① (←) ..... 101
FIGURE 89 - PROFIL D'INTENSITE SUR LA COMPOSANTE L* (CIELAB D65), LUMIERE COLLIMATEE OBLIQUE. ② (→) ..... 101
FIGURE 90 - PROFIL RADIAUX DES IMAGES TESTS : LUMIERE DIFFUSE ① (←), LUMIERE COLLIMATEE OBLIQUE ② (→) ..... 102
FIGURE 91 - EXEMPLE DE COUPE STRATIGRAPHIQUE D'UNE COUCHE DE PEINTURE DU XV$^{E}$ ..... 103
FIGURE 92 - MIRE UNIBO (LITHOPONE ET TERRE VERTE SANS VERNIS), L.A.M. COMPARATIVES ..... 104
FIGURE 93 - COMPARAISON D'UN ECLAIRAGE DIFFUS (←) © MUSEE DU LOUVRE - ET UN ECLAIRAGE COLLIMATE A ANGLE DE BREWSTER (→). © P. COTTE - ..... 105

## Chapitre 5

FIGURE 94 - LA JOCONDE OU MONNA LISA, MUSEE DU LOUVRE PARIS, HUILE SUR PEUPLIER, 534 × 794 × 14 MM ..... 111
FIGURE 95 - COUPE TRANSVERSALE D'UN ARBRE, SECTIONS UTILISEES POUR UNE PLANCHE A PEINDRE. © P. COTTE ..... 112
FIGURE 96 - CADRE DE CONTENTION POUR PLANCHE A PEINDRE - LEONARD DE VINCI MANUSCRIT A, FOLIO 1 RECTO ..... 113
FIGURE 97 - (A) LE COIN SUPERIEUR GAUCHE DE LA PLANCHE DE LA JOCONDE ; (B) LE COIN INFERIEUR GAUCHE DE LA DAME A L'HERMINE (NUMERISEE AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE EN 2007) ; (C) LE COIN INFERIEUR DROIT DE LA BELLE FERRONNIERE (NUMERISEE AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE EN 2011). © P. COTTE ..... 113
FIGURE 98 - DETAIL DE L'ŒIL DE LA JOCONDE A 1523 DPI - FILTRE 560 NM + INFORMATION COULEUR © P. COTTE ..... 115
FIGURE 99 - LA RESTAURATION DANS LA PARTIE SUPERIEURE DE L'IMAGE RECOUVRE LES CRAQUELURES. (DETAIL DU CIEL DE LA JOCONDE.) @ P. COTTE ..... 117
FIGURE 100 - LES SIX PRINCIPAUX TYPES DE CRAQUELURES SUR LA JOCONDE @ P. COTTE (1) CIEL, (2) VOILE, (3) VISAGE, (4) ACCOUDOIR, (5) CENTRE MAIN DROITE, (6) AU CENTRE SUR LA ROBE @ P. COTTE ..... 117

FIGURE 101 - TABLEAU DE PIGMENTS ANCIENS UTILISES A LA RENAISSANCE AVEC ET SANS VERNIS VIEILLI REALISE AVEC F. PEREGO . 122
FIGURE 102 - LA JOCONDE COULEURS D65 (LUMIERE DU JOUR STANDARD) (←) - LA JOCONDE APRES DEVERNISSAGE VIRTUEL (→) © P. COTTE ..... 123
FIGURE 103 - EXEMPLES DE SPECTRES VERNIS/DEVERNIS PRIS SUR LA JOCONDE ..... 124
FIGURE 104 - CARTE DES POINTS DE MESURES POUR L'IDENTIFICATION DES PIGMENTS SUR LA JOCONDE : ..... 129
FIGURE 105 - EXEMPLES DE SPECTRES MESURES SUR LA JOCONDE AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE, RECONSTRUCTION PCHIP .. 130
FIGURE 106 - SPECTRES DES PIGMENTS BLEUS MESURES AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ..... 131
FIGURE 107 - SPECTRES DES PIGMENTS VERTS MESURES AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ..... 131
FIGURE 108 - SPECTRES DES PIGMENTS ROUGES MESURES SUR LA MIRE XVII$^{E}$ AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ..... 131
FIGURE 109 - SPECTRES DES PIGMENTS JAUNES MESURES SUR LA MIRE XVII$^{E}$ AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ..... 132
FIGURE 110 - SPECTRES DES PIGMENTS BLANCS ET NOIRS MESURES SUR LA MIRE XVII$^{E}$ AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ..... 132
FIGURE 111 - MIRE DES PIGMENTS UTILISES JUSQU'AU XVII$^{E}$ SIECLE, REALISE PAR F. PEREGO ET LUMIERE TECHNOLOGY ..... 133
FIGURE 112 - ÉCRAN DU LOGICIEL DE FORMULATION © CIBA ..... 134
FIGURE 113 - COMPARAISON DES SPECTRES MESURES (TRAITS NOIRS) ET DES PREDICTIONS DE MELANGES OPTIMISES (TRAITS BLEUS) SUR LA JOCONDE PAR LE LOGICIEL DE FORMULATION COLIBRI™ ..... 137
FIGURE 114 - MELANGES DE PIGMENTS IDENTIFIES PAR ZONE D'INTERET. © P. COTTE ..... 145
FIGURE 115 - (A) 11 POINTS DE MESURES DEVERNIS SUR LE VISAGE DE LA JOCONDE. - (B) 11 SPECTRES DE REFLECTANCE DIFFUS ... 147
FIGURE 116 - IDENTIFICATION DU PIGMENT DE LA COUCHE SUPERIEURE DE LA JOCONDE CORRESPONDANT AU SPECTRE SANS VERNIS DE L'EMPLACEMENT (J). ..... 148
FIGURE 117 - LES SPECTRES DE REFLECTANCE DU MELANGE COMPOSE DE VERMILLON ET DE BLANC DE PLOMB. ..... 148
FIGURE 118 - VARIATIONS COLORIMETRIQUES DANS LES PLANS DE CHROMATICITE C* ET DE LUMINANCE L* DE L'ESPACE CIE-LAB DU VISAGE DE LA JOCONDE, DEDUITES DES 11 SPECTRES EXPERIMENTAUX NON VERNIS PRECEDENTS PRESENTES DANS LA FIGURE 115B PAGE 147. ..... 149
FIGURE 119 - VARIATIONS SPECTRALES DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION K ET DE DIFFUSION S (EN $M^{-1}$) DE L'OMBRE IDENTIFIEE DANS LA COUCHE SUPERIEURE DU VISAGE DE LA JOCONDE. ..... 151
FIGURE 120 - CE DIAGRAMME REPRESENTE LES VARIATIONS DE LA CLARTE EN FONCTION DE LA SATURATION DES COULEURS DU VISAGE DE LA JOCONDE ET MONTRE UN MAXIMUM DE SATURATION. ..... 151
FIGURE 121 - COMPARAISON ENTRE LES VARIATIONS DE COULEUR SIMULEES DU GLACIS PRECEDENT ET CELLES D'UN MELANGE DE PIGMENTS COMPOSE DE TERRE D'OMBRE ET DE BLANC DE PLOMB AVEC DES PROPORTIONS VARIABLES. ..... 152
FIGURE 122 - TROIS CONTRIBUTIONS A LA DIFFUSION GLOBALE PROVENANT DU FLUX LUMINEUX. ..... 154
FIGURE 123 - EMPLACEMENTS DE QUELQUES EXEMPLES DE DESSINS PREPARATOIRES (←) ..... 156
FIGURE 124 - (1) UNE LIGNE NOIRE, PRESQUE VERTICALES DESSINE LE BORD D'UN ANCIEN VOILE (→)© P. COTTE ..... 156
FIGURE 125 - (2) DESSINS D'ENTRELACS ET DE BRODERIES AU BORD DU DECOLLETE DE LA ROBE (←)© P. COTTE ..... 156
FIGURE 126 - (3) DESSIN DE LA CONSTRUCTION DU PIED DE LA COLONNE DE GAUCHE (→)© P. COTTE ..... 156
FIGURE 127 - UN DESSIN EN FORME DE DOME, DANS LE PAYSAGE DE MONTAGNES (5) (←) © P. COTTE ..... 157
FIGURE 128 - UN DESSIN D'AIGUILLE A CHEVEUX (4) (→) © P. COTTE ..... 157
FIGURE 129 - DESSINS DE DEUX CROIX AUX CENTRES DES YEUX, RETROUVES AVEC LES IMAGES L.A.M. © P. COTTE ..... 157
FIGURE 130 - TRACES DIGITALES, ADORATION DES MAGES. © MUSEE DES OFFICES. FLORENCE. ..... 159
FIGURE 131 - TRACES DIGITALES, LA DAME A L'HERMINE, MUSEE CZARTORYSKI, CRACOVIE - DETAIL MESURES INTERLIGNES. © P. COTTE ..... 159
FIGURE 132 - TRACES DIGITALES, LA BELLE PRINCESSE, COLLECTION SUISSE. © P. COTTE ..... 159
FIGURE 133 - TRACES DIGITALES RETROUVEES SUR LE COU DE LA JOCONDE AVEC LES IMAGES L.A.M. © P. COTTE ..... 160
FIGURE 134 - TRACES DIGITALES RETROUVEES ENTRE LES DEUX MAINS DE LA JOCONDE AVEC LES IMAGES L.A.M. © P. COTTE ..... 161
FIGURE 135 - SILLONS DE GRATTAGE (EN ROUGE) DANS LE CIEL DE LA JOCONDE © P. COTTE ..... 162
FIGURE 136 - SILLONS ET CRAQUELURES DANS LE CIEL DE LA JOCONDE AU BORD DE LA TETE © P. COTTE ..... 163
FIGURE 137 - DETAILS DE LA MAIN GAUCHE DE LA JOCONDE QUI MONTRE LA CORRECTION DE L'INDEX ET DU MAJEUR : (←) IMAGE L.A.M. QUI MONTRE LES HACHURES SITUEES SOUS LA PREMIERE PHALANGE DE L'INDEX ; (CENTRE) IMAGE INFRAROUGE 2000 NM © LOUVRE ; (→) IMAGE COULEUR. © P. COTTE ..... 164

FIGURE 138 - PARTIE SUPERIEURE DROITE DE LA TETE DE LA JOCONDE : (A) IMAGE COULEUR ; (B) INFRAROUGE 1700 NM QUI MONTRE LE DESSIN DE L'ANCIEN CONTOUR © LOUVRE ; (C) IMAGE L.A.M. QUI MONTRE LES HACHURES SITUEES SUR LE CONTOUR. © P. COTTE ..... 164
FIGURE 139 - DETAIL DU CIEL DE LA JOCONDE, A DROITE DE LA TETE. © P. COTTE ..... 165
FIGURE 140 - ÉPINGLES EN ALLIAGE DE CUIVRE (XV$^{E}$-XVI$^{E}$) COMPOSEES D'UNE TIGE AVEC FIL TIRE ET D'UNE TETE SPHERIQUE DE DIAMETRE 4.1 MM ; TIGE 46.7 MM. KENT COUNTY COUNCIL (ID : KENT-EB4B07) ..... 166
FIGURE 141 - DETAILS RETROUVES AVEC DIFFERENTES IMAGES L.A.M. DANS LE CIEL DE LA JOCONDE. © P. COTTE ..... 166
FIGURE 142 - MOSAÏQUE DE DIFFERENTES IMAGES L.A.M. AUTOUR DE LA TETE DE LA JOCONDE. © P. COTTE ..... 167
FIGURE 143 - (A) LAM #1378 DF 0-5-8 - (B) LAM #1446 DF 1-8-9 © P. COTTE ..... 167
FIGURE 144 - ÉTUDE POUR LA TETE DE LA SAINTE ANNE (VERS 1501), LEONARD DE VINCI (1452- 1519) (←) ..... 168
FIGURE 145 - CERCHIA DI RAFFAELLO DE' CARLI O CAPPONI, DETTO RAFFAELLINO DEL GARBO. TEMPERA SUR BOIS. XV$^{E}$. COLL. P. (CENTRE) ..... 168
FIGURE 146 - MADONE AVEC L'ENFANT ET DEUX ANGES (1460-1465 CA) - DETAIL, FRA FILIPPO LIPPI (1406-1469) (→) ..... 168
FIGURE 147 - LA VIERGE A L'ENFANT AVEC QUATRE ANGES ET LES SAINTS (1487 CA) - DETAIL, ALESSANDRO FILIPEPI DIT SANDRO BOTTICELLI, RETABLE DU PALAIS DE SAN BARNARBA, TEMPERA SUR BOIS - 268 X 280 CM, GALERIE DES OFFICES (←) ..... 168
FIGURE 148 - MADONNA COL BAMBINO (1466) - DETAIL, FRA FILIPPO LIPPI (1406-1469), TEMPERA SUR BOIS - 155 X 71 CM, PALAZZO MEDICI RICCARDI A FLORENCE (→) ..... 168
FIGURE 149 - PORTRAIT DE MADDALENA DONI STROZZI (1506), ..... 169
FIGURE 150 - LA JOCONDE AUJOURD'HUI AU MUSEE DU LOUVRE (←) ..... 170
FIGURE 151 - SYNTHESE DES CONTOURS DU PORTRAIT ORIGINAL RETROUVES AVEC LES MOSAÏQUES D'IMAGES L.A.M (→) © P. COTTE ..... 170
FIGURE 152 - LA JOCONDE, SIMULATION DU PORTRAIT ORIGINAL (←) © 2015 P. COTTE ; CARTOGRAPHIES DU CUIVRE (CENTRE) ; CARTOGRAPHIE DU MERCURE (→) © 2019 LABORATOIRE DES MUSEES DE FRANCE ..... 171
*FIGURE 153 - LES QUATRE POSITIONS EXTREMES DU CAPTEUR MATRICIEL SUR UN BANC XY POUR RECONSTITUER UN PLAN FOCAL PLUS LARGE.* ..... 175
FIGURE 154 - NUMERISATION MULTISPECTRALE DU PALIMPSESTE L99 SUP, BIBLIOTHEQUE AMBROSIENNE, MILAN. - IMAGE APRES TRAITEMENTS MONTRANT LE TEXTE ORIGINAL DE PTOLEMEE ET SES PREMIERES ILLUSTRATIONS. ..... 177

## ANNEXE

FIGURE 155 - 256 IMAGES L.A.M. PRISES PARMI LES 1650 CALCULEES ..... L
FIGURE 156 - L.A.M. # 917, CALCULEE AVEC LA DERIVEE RESIDUELLE ET LES REFLECTANCES 440-480 ET 520 NM ..... M
FIGURE 157 - L.A.M. # 1401, CALCULEE AVEC LA DERIVEE RESIDUELLE ET LES REFLECTANCES 400-520 ET 900 NM ..... N
FIGURE 158 - L.A.M. #75, CALCULEE AVEC K/S, $pcor$ 1.2 ET LES REFLECTANCES 900 ET 680 NM ..... O

## Suppléments

FIGURE 159 - CAPTEUR CCD LINEAIRE THOMSON-CSF TH-7834C - 12 000 PIXELS DE 6.5 X 6.5 µM ..... - 2 -
FIGURE 160 - SENSIBILITE SPECTRALE DU CCD - 7834C - COMPARAISON DES 2 MESURES. ..... - 3 -
FIGURE 161 - LES VALEURS MEDIANES, FONCTION DU TEMPS D'EXPOSITION (CERCLES) SUIVENT UNE DROITE (POINTS NOIRS) ..... - 7 -
FIGURE 162 - COUPE DE L'OPTIQUE RODAGON 1:5.6 F=210 MM 6 ELEMENTS (3+3) ..... - 8 -
FIGURE 163 - VARIATIONS DU FOCUS EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE. ..... - 8 -
FIGURE 164 - 4 CRITERES D'EVALUATION DE LA RESOLUTION ..... - 10 -
FIGURE 165 - MIRE ISO 16067-1 ..... - 12 -
FIGURE 166 - EXEMPLE DE FILTRE A POSER A L'ENTREE DE L'OPTIQUE POUR UNE CORRECTION DE PERTE EN LUMINOSITE AVEC N=4 - 13 -
FIGURE 167 - TRANSMITTANCE DE L'OPTIQUE RODAGON 210 MM ..... - 13 -
FIGURE 168 - BARILLET A 13 FILTRES + FILTRE NEUTRE. ..... - 14 -
FIGURE 169 - SCHEMA D'ASSEMBLAGE D'UN FILTRE SOFT-COATING. ..... - 15 -
FIGURE 170 - BANDES PASSANTES DES 13 FILTRES - SOFT COATING - EPAIS. 7 MM UTILISES DE 2001 A 2021 (←) ..... - 17 -
FIGURE 171 - BANDES PASSANTES DES 13 FILTRES - HARD COATING - EPAIS. 2 MM DEPUIS 2021 (→) ..... - 17 -
FIGURE 172 - TRANSMITTANCE DU FILTRE 400 NM B.P. 36 HARD-COATING SUR UNE ECHELLE DE 0.1 %. ..... - 19 -

FIGURE 173 - EFFICACITE QUANTIQUE (Q.E.) X TRANSMITTANCE DES FILTRES PREMIERE GENERATION - SOFT COATING (←) ..... - 19 -
FIGURE 174 - EFFICACITE QUANTIQUE (Q.E.) X TRANSMITTANCE DES FILTRES DEUXIEME GENERATION - HARD COATING (→)..... - 19 -
FIGURE 175 - MESURES GONIOMETRIQUES C.H.A. EN TRANSMITTANCE DU FILTRE 640 NM BP 40 SOFT-COATING (←) ..... - 21 -
FIGURE 176 - MESURES GONIOMETRIQUES C.H.A. EN TRANSMITTANCE DU FILTRE 640 NM BP 36 HARD-COATING. (→) ..... - 21 -
FIGURE 177 - BANC MICRO-METRIQUE ALME STAR ..... - 22 -
FIGURE 178 - VUE INTERIEURE DU PROTOTYPE DE LA CAMERA - BARILLET A FILTRES EN POSITION DEVANT LE CAPTEUR CCD RELIE AU CENTRE OPTIQUE PAR UNE BARRE..... - 23 -
FIGURE 179 - LE SOCLE DE LA CAMERA EN POSITION AVANCEE (←) ET EN POSITION DE RECUL (→)..... - 23 -
FIGURE 180 - DEUX PORTE-FILTRES ADDITIONNELS PEUVENT ETRE POSITIONNES DERRIERE L'OPTIQUE - ICI CONFIGURES AVEC UNE OCCLUSION ET UN DIFFUSEUR..... - 24 -
FIGURE 181 -VUE EN COUPE SIMPLIFIEE DU PRINCIPE OPTO-MECANIQUE DES PROJECTEURS DE LA CAMERA..... - 26 -
FIGURE 182 - PROTOTYPE DE PROJECTEUR EN FORME DE SECTION D'ARC DE DEMI-ELLIPSE..... - 26 -
FIGURE 183 - PROJECTEUR EN FORME DE SECTION DE QUART D'ELLIPSE FABRIQUE A PARTIR D'UNE FEUILLE D'ALUMINIUM POLIE. - 27 -
FIGURE 184 - LES PROJECTEURS, EQUIPES DE MIROIRS MONOBLOCS ALUMINIUM, SONT POSITIONNES SYMETRIQUEMENT AU PLAN DE NUMERISATION. ILS PRODUISENT UNE BANDE DE LUMIERE COLLIMATEE ETROITE (ICI, TUNGSTENE-HALOGENE). ..... - 27 -
FIGURE 185 - LAMPE HQI VERSION NEUTRAL DAY LIGHT (NDL) 150 W - RS7 ET SPECTRE D'EMISSION. © OSRAM ..... - 30 -
FIGURE 186 - MOYENNE DES VARIATIONS D'EMISSIVITE SPECTRALE DE 16 LAMPES HCI POUR LES 13 FILTRES DE LA CAMERA. ..... - 31 -
FIGURE 187 - DIFFERENTES TEMPERATURES DE COULEUR PROPOSEES POUR LES LAMPES HID XENON..... - 32 -
FIGURE 188 - LAMPE XENON HID H3. 200 W - 6000 K. © MESURES DR. KADJA REBEC..... - 32 -
FIGURE 189 - PROJECTEUR EQUIPE DE 20 HID XENON. ICI, MONTE SUR SUPPORT MOTORISE ET AVEC BOITIER ELECTRONIQUE..... - 32 -
FIGURE 190 - OSCILLOSCOPE, SIGNAL LUMINEUX D'UNE LAMPE HID 6000K 200W MESURE AVEC UNE PHOTODIODE..... - 33 -
FIGURE 191 - INSTALLATION DE LA CAMERA ET DES PROJECTEURS DOUBLE ELLIPSES SUPERPOSEES - DEUX BARRES DE MAINTIEN SUPPORTENT DES MIRES DE REPERE ET DES BLANCS DE REFERENCE EN TEFLON. ..... - 35 -
FIGURE 192 - NUMERISATION DES 13 FICHIERS BLANCS DE REFERENCE SUR UN PANNEAU DE TEFLON UNIFORME. ..... - 41 -
FIGURE 193 - LA NORMALISATION DES 13 IMAGES. FLATFIELD..... - 42 -
FIGURE 194 - REFERENT DE BLANC EN TEFLON INCORPORE AUX IMAGES NUMERISEES ..... - 42 -
FIGURE 195 - DIFFERENCE D'ECHELLE ENTRE LES FILTRES 560 NM ET 1000 NM, LES TREIZE IMAGES CORRIGEES ET SUPERPOSEES. - 43 -
FIGURE 196 - LA BANDE PASSANTE D'UN FILTRE PEUT DONNER TROIS REPONSES IDENTIQUES POUR TROIS COURBES SPECTRALES DIFFERENTES..... - 44 -
FIGURE 197 - QUELQUES PIGMENTS CARACTERISTIQUES UTILISES PAR LA PLUPART DES PEINTRES. ..... - 45 -
FIGURE 198 - RECONSTRUCTION D'UN SPECTRE PAR UNE BSPLINE CALCULE SUR 13 MESURES DONNEES PAR LA CAMERA MULTISPECTRALE. LA COURBE NE PASSE PAS SYSTEMATIQUEMENT PAR LES POINTS DE MESURE. ..... - 47 -
FIGURE 199 - SPECTRE INTERPOLE AVEC LA METHODE PCHIP..... - 48 -
FIGURE 200 - SPECTRES MESURES AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ET RECONSTRUITS AVEC LA METHODE PCHIP EN COMPARAISON AVEC LES MESURES AU SPECTROPHOTOMETRE MINOLTA D2600. ..... - 50 -
FIGURE 201 - ILLUMINANT D65, LUMIERE DU JOUR - 560 NM EST EGAL A 1 PAR DEFINITION. DOMAINE VISIBLE 360 A 760 NM. - 53 -
FIGURE 202 - ESPACE CIE-LAB ..... - 54 -
FIGURE 203 - REPRESENTATION 3D DE L'ESPACE CIE-LAB DE LA JOCONDE (D65) ..... - 55 -

# INDEX DES TABLEAUX

## Chapitre 1

TABLEAU 1 - CALCULS DE LA RESOLUTION THEORIQUE PIXELS/MM - FOCALE 210 MM - N=5.6 POUR LE RAYONNEMENT VISIBLE ET INFRAROUGE DE 400 NM A 3800 NM. DIAMETRES DE LA TACHE D'AIRY, CRITERE DE RAYLEIGH, CRITERE DE SPARROW ET NOMBRE DE PIXELS/MM. ..... 14

## Chapitre 2

TABLEAU 2 - SYNTHESE DES CONDITIONS D'ACQUISITION ..... 59
TABLEAU 3 - REGLAGES DES GAINS POUR CHAQUE FILTRE ..... 59
TABLEAU 4 - SPECIFICATIONS TECHNIQUES DEUX ACQUISITIONS ..... 60

## Chapitre 3

TABLEAU 5 - ÉPAISSEURS AVEC APPLICATEUR (COUCHES HUMIDES) ESTIMEES AVEC COMPARATEUR MICROMETRIQUE (COUCHES SECHES). ..... 84

## Chapitre 4

TABLEAU 6 - MIRE PAPIER JOURNAL - MESURES DE CHROMA C* ET CLARTE L* POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'ECLAIRAGE ..... 99
TABLEAU 7 - MIRE UNIBO - MESURES DE CHROMA C* ET CLARTE L* POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'ECLAIRAGE ..... 99
TABLEAU 8 - EXEMPLE DE MATRICE DE DEVERNISSAGE. ..... 123

## Chapitre 5

TABLEAU 9 - LISTE DES PIGMENTS DISPONIBLES AU XVII$^{E}$ SIECLE, INCLUANT LA PERIODE DE LA RENAISSANCE ITALIENNE ..... 134
TABLEAU 10 - SYNTHESE DES PIGMENTS IDENTIFIES SUR LA JOCONDE AVEC LES CINQ METHODES. CLASSIFICATION DES HYPOTHESES DE MELANGES OU SUPERPOSITIONS DE PIGMENTS DETECTES PAR SPECTROPHOTOMETRIE (COLONNE GRISE) ..... 140
TABLEAU 11 - SYNTHESE DES HYPOTHESES DE MELANGES DE PIGMENTS IDENTIFIES ET REGROUPES PAR ZONE D'INTERET. © P. COTTE ..... 144

## Suppléments

TABLEAU 12 - NIVEAUX DE GAINS AJUSTABLES - COURBE DU FACTEUR D'AMPLIFICATION ET DU NIVEAU EN DB ..... - 6 -
TABLEAU 13 - CALCULS DE RESOLUTION THEORIQUE PIXELS/MM D'UNE FOCALE DE 210 MM A OUVERTURE N=5.6 ..... - 11 -
TABLEAU 14 - MESURES DE LA CTF A N=8 POUR TOUS LES FILTRES AVEC UN FOCUS SPECIFIQUE INDIVIDUELLEMENT. LES CTF DES FILTRES 400, 760, ET 1000 NM SONT AUSSI DONNES AVEC UN FOCUS IDENTIQUE AU FILTRE 560 NM A 277.90 MM. ..... - 11 -
TABLEAU 15 - EPAISSEUR DES FILTRES SOFT-COATING 1$^{ERE}$ GENERATION, EXEMPLE DE TIRAGE OPTIQUE. ..... - 14 -
TABLEAU 16 - COMPARAISONS DES CARACTERISTIQUES ET DES PERFORMANCES OPTIQUES ET PHYSIQUES DES FILTRES DE 2001 EN SOFT-COATING ET DE 2021 EN HARD-COATING. ..... - 18 -
TABLEAU 17 - PRINCIPALES RAIES D'EMISSION (NM) DE QUELQUES TERRES RARES UTILISEES DANS LES LAMPES A DECHARGES (HQI, HCI, HTI, HID, ETC.) ..... - 29 -
TABLEAU 18 - SYNTHESE DES TESTS DES DIFFERENTES SOURCES DE LUMIERE. ..... - 34 -
TABLEAU 19 - PARAMETRE D'EXPOSITION POUR LA NUMERISATION DE ST. JACQUES LE MINEUR, GEORGES DE LA TOUR, MUSEE TOULOUSE LAUTREC, ALBI EN 2003 AVEC LES FILTRES SOFT-COATING ET L'ECLAIRAGE HQI (2 X 4 LAMPES) (←) ..... - 38 -
TABLEAU 20 - PARAMETRE D'EXPOSITION POUR LA NUMERISATION DE LA MADONE DU SILENCE C.1560, HUILE SUR BOIS, 58.3X43.2CM. COLL. PRIVEE EN 2024 AVEC LES FILTRES HARD-COATING ET L'ECLAIRAGE AU XENON H3 (2 X 20 LAMPES) (→) .- 38 -
TABLEAU 21 - SYNTHESE DES CALCULS GFC ET RMSE - COMPARAISON DES SPECTRES MESURES AVEC LA CAMERA MULTISPECTRALE ET RECONSTRUITS AVEC LA METHODE PCHIP AVEC LES SPECTRES MESURES AVEC LE SPECTROPHOTOMETRE MINOLTA D3600.- 50 -
TABLEAU 22 - ÉVALUATIONS DES ECARTS DE COULEURS ..... - 56 -
TABLEAU 23 - COORDONNEES CIE-LAB ET DES ÉCARTS DE COULEUR $\Delta Eab*$ POUR LES PIGMENTS DU XVII$^{E}$ SIECLE SOUS ÉCLAIRAGE D65 ..... - 57 -

# INTRODUCTION DE LA THESE

L'étude des œuvres d'art est depuis longtemps au croisement de la science, de l'histoire et de la créativité humaine. Les évolutions scientifiques contemporaines ont transformé la manière dont nous étudions les œuvres d'art, en renouvelant profondément les approches de la conservation, de la restauration et de l'authentification, tout en renforçant la lutte contre la falsification. Aujourd'hui, des outils à la pointe de la technologie permettent d'examiner les matériaux, les techniques et les structures internes des créations artistiques avec une précision sans précédent, ouvrant de nouvelles perspectives sur leur histoire et leur composition. Ces avancées reposent sur des années de recherche scientifique interdisciplinaire, combinant innovations technologiques et études historiques. Cette convergence entre sciences exactes, histoire de l'art et innovation technologique offre non seulement des solutions non destructives pour préserver le patrimoine, mais aussi des moyens plus efficaces de démasquer les contrefaçons et de mieux comprendre les chefs-d'œuvre, enrichissant ainsi nos connaissances tout en garantissant leur intégrité pour les générations futures. C'est dans ce cadre, à la croisée de l'exploration scientifique et du respect de l'art, que s'inscrit l'analyse des œuvres, comme le démontre le développement de technologies telles que l'imagerie multispectrale, qui viennent répondre à des enjeux historiques et méthodologiques complexes.

Depuis l'Antiquité, des méthodes ont été employées pour conserver et analyser les créations artistiques. Au Moyen Âge, l'approche empirique dominait : les artisans mélangeaient des pigments naturels avec des liants sans une compréhension approfondie de leurs propriétés chimiques. Cependant, cette période a vu l'émergence d'ouvrages techniques, comme les manuscrits de Théophile ou les traités italiens de Cennino Cennini, qui décrivaient des recettes et des techniques pour la préparation des peintures. Ces documents, bien que techniques, témoignaient également d'une démarche de recherche empirique visant à mieux comprendre les matériaux et leur comportement. La Renaissance marque un tournant majeur avec l'avènement de la perspective linéaire et une exploration scientifique accrue des matériaux. Léonard de Vinci, à travers ses études sur l'optique et la lumière, a jeté les bases d'une compréhension plus rationnelle des phénomènes visuels et chromatiques. Il a notamment élaboré le *sfumato*, une technique révolutionnaire de transitions subtiles entre les ombres et les lumières, qui confère à ses œuvres, et particulièrement à *La Joconde*, une profondeur et une douceur inégalées. Cependant, les artistes demeuraient contraints par les outils rudimentaires dont ils disposaient pour travailler les couleurs et en comprendre les propriétés. Cette époque reflétait également une connaissance encore imparfaite des matériaux et de leur interaction avec la lumière. Ce n'est qu'au fil des siècles suivants que des avancées significatives dans les instruments et les méthodes d'analyse ont permis de surmonter ces limitations.

*Figure 1 - Première gravure de* La Joconde *vers 1651*

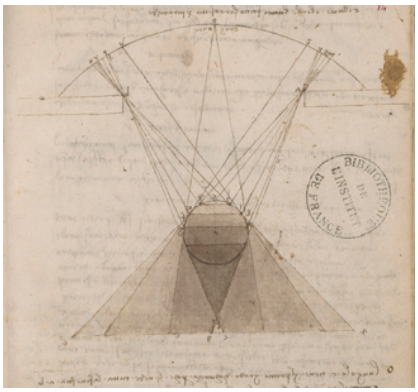


*Figure 2 - Étude des ombres - Léonard de Vinci - Ital. 2028 Manuscrit 2185 16r (folioté 14) -Bibl. de l'Institut*

Les XVII[e] et XVIII[e] siècles ont vu l'introduction des premiers instruments optiques, tels que les microscopes et les lentilles, utilisés pour examiner les structures des peintures et des matériaux. La couleur, élément fondamental de l'art, a suscité des études approfondies, notamment avec les travaux de Newton sur la lumière et le spectre visible, suivis par les théories de Maxwell et Helmholtz sur la perception humaine des couleurs.

Au XIX[e] les avancées en physique, notamment avec la spectroscopie, ont marqué un tournant dans l'étude scientifique des œuvres d'art. Initialement développée pour l'astronomie, cette technique a offert un moyen révolutionnaire de décomposer la lumière réfléchie par les œuvres, permettant d'analyser les interactions spécifiques entre les longueurs d'onde et les matériaux comme les pigments et les liants. Cependant, ces approches reposaient souvent sur des méthodes destructives, telles que les analyses chimiques sur micro-prélèvements, la chromatographie ou la spectrométrie de masse, qui nécessitaient de prélever des échantillons, compromettant l'intégrité des œuvres. Ces méthodes, bien qu'efficaces, étaient controversées pour des chefs-d'œuvre d'une importance patrimoniale majeure comme *La Joconde*, où chaque intervention devait respecter des exigences strictes de conservation. Néanmoins, elles ont permis de lever une partie du mystère sur les pigments utilisés par Léonard de Vinci, tout en soulignant les tensions persistantes entre la quête de données précises et la préservation de l'intégrité des œuvres.

*Figure 3 - Étude d'un tableau au laboratoire des musées de France - 1961*

A la fin du XIX[e] siècle et au début du XX[e] siècle, un nouvel espoir émergeait : celui de pouvoir analyser les œuvres sans contact direct. La photographie en noir et blanc, puis en couleur, a profondément transformé la documentation et l'analyse des œuvres d'art, permettant une meilleure conservation visuelle et une large diffusion de leurs images. Par la suite, l'avènement de l'imagerie infrarouge (voir Figure 4) a marqué un tournant décisif en ouvrant la possibilité d'explorer les sous-couches des peintures. D'abord réalisée à l'aide de films photographiques noir et blanc, puis de films couleur en fausse couleur infrarouge, et enfin grâce aux caméras Vidicon, cette technologie a offert des perspectives inédites. Appliquées à *La Joconde*, les techniques infrarouges ont révélé des détails jusqu'alors invisibles, tels que des repentirs et des ajustements dans la composition, mettant en lumière une partie du processus créatif de Léonard de Vinci.

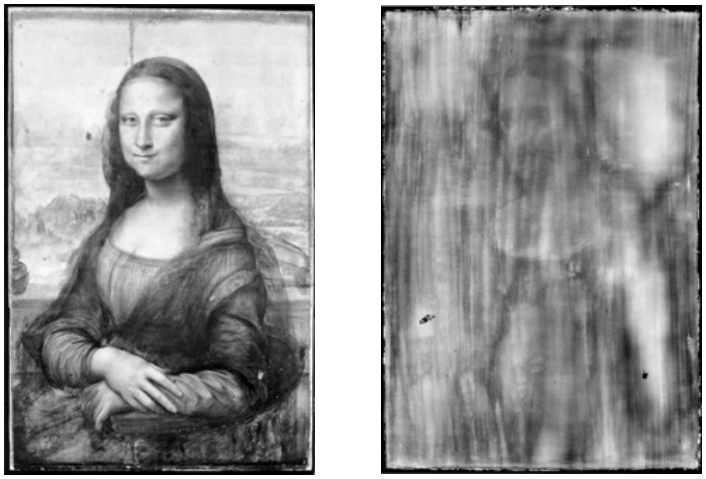


*Figure 4 - Infrarouge (←) © P. Cotte et rayon X de* La Joconde *(→)© Musée du Louvre*

Dans les années 1950, Magdeleine Hours, conservatrice au Musée du Louvre, a été parmi les premières à utiliser les rayons X pour l'étude des tableaux (Hours, 1964) au Musée du Louvre. Lorsqu'elle a appliqué cette méthode à *La Joconde* (voir Figure 4), elle a révélé une image fantomatique montrant un visage légèrement tourné vers sa droite, suggérant des modifications ou des étapes antérieures dans la création de l'œuvre.

Cependant, malgré ces avancées, les technologies disponibles restaient insuffisantes pour des analyses non destructives approfondies jusqu'aux années 1990. Avec l'essor de la photographie numérique, un pas en avant a été franchi en matière de précision colorimétrique, permettant une meilleure restitution des couleurs. Toutefois, cette technologie hérita des mêmes limitations fondamentales que la photographie analogique. Les appareils photographiques numériques RGB, qui dominaient alors le marché, se basaient sur trois bandes de couleurs primaires, une configuration inadaptée aux exigences spécifiques de l'analyse scientifique. De plus, les premières photographies numériques de *La Joconde* étaient limitées en résolution spatiale, ce qui restreignait leur capacité à capturer les détails complexes de l'œuvre, comme les craquelures ou les subtilités des glacis de Léonard de Vinci. Ces capteurs ne permettaient ni de différencier les nuances subtiles des pigments historiques ni de résoudre les problèmes de métamérie, ce qui rendait certaines restaurations invisibles ou déformées selon les conditions d'éclairage. Ces faiblesses ont rapidement mis en évidence un manque critique d'outils adaptés pour répondre aux besoins des conservateurs et des historiens de l'art, soulignant la nécessité de technologies plus avancées.

C'est dans ce contexte que l'imagerie multispectrale émerge, promettant d'ouvrir de nouveaux horizons pour la science de l'art et proposant une solution qui dépasse les limitations des technologies conventionnelles. Fruit de recherches approfondies en optique et en spectrométrie, cette technologie marque une avancée significative pour l'analyse scientifique non destructive des œuvres d'art. En plus d'être une photographie, elle introduit la notion de mesure scientifique, permettant de capturer des données dans une multitude de bandes spectrales. Cette approche offre ainsi une vision approfondie des matériaux et de leur interaction avec la lumière, combinant documentation visuelle et analyse quantitative.

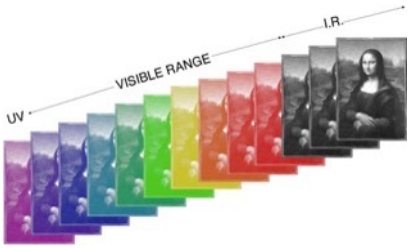



*Figure 5 - Multispectral de* La Joconde

A l'aube du XXI[e] siècle, malgré les progrès significatifs dans le domaine, l'application de l'imagerie multispectrale aux œuvres d'art présentait encore des obstacles considérables qui nécessitent des solutions multidimensionnelles. Sur le plan technique, l'un des principaux défis réside dans la conception d'équipements capables de capturer des données spectrales d'une grande précision tout en maintenant une résolution spatiale extrêmement élevée. Cette exigence est essentielle pour analyser des détails microscopiques, tels que les craquelures ou les traits fins, souvent indispensables dans l'attribution d'une œuvre ou dans l'étude de son état de conservation. Toutefois, parvenir à un équilibre entre la précision spectrale et la résolution spatiale reste complexe, car l'amélioration d'un paramètre peut compromettre l'autre.
Les projets pionniers comme les travaux de la National Gallery (1993-1996) et la caméra multispectrale développée par Lumière Technology (1998-1999) décrite dans cette thèse dont l'utilisation appliquée aux œuvres d'art a été validée dans le projet européen CRISATEL (2001), ont relevé le défi et démontré le potentiel de cette technologie pour l'étude scientifique des œuvres d'art. Sur le plan méthodologique, l'interprétation des données recueillies repose sur une compréhension approfondie des interactions complexes entre la lumière et les matériaux constitutifs de l'œuvre. Chaque couche

picturale, chaque pigment et chaque liant réagit différemment à la lumière, générant des phénomènes tels que la réflexion, la diffusion ou l'absorption, qui doivent être modélisés avec rigueur. Une connaissance insuffisante de ces phénomènes peut conduire à des analyses erronées ou incomplètes.

Enfin, sur le plan analytique, l'exploitation des données multispectrales nécessite des outils de traitement performants, capables de transformer cette abondance d'informations en enseignements exploitables. Cela inclut non seulement l'identification précise des matériaux, mais aussi la révélation de détails enfouis sous des couches picturales, comme des esquisses préparatoires, des repentirs ou des restaurations anciennes. L'élaboration d'algorithmes puissants et d'approches de traitements adaptées est donc essentielle pour maximiser le potentiel de cette technologie. Ces défis démontrent la nécessité d'une approche intégrée qui combine des avancées matérielles, des méthodes d'acquisition améliorées et des outils d'analyse novateurs.

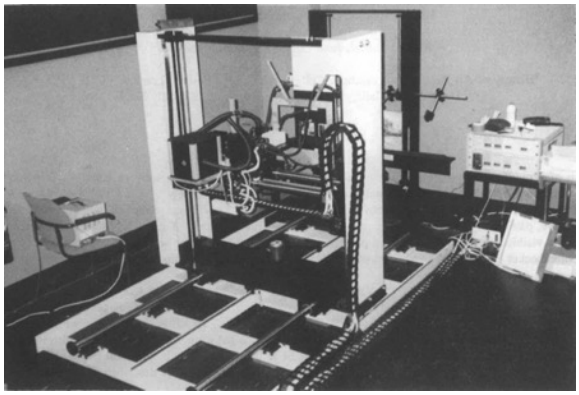


*Figure 6 - Système multispectrale de la National Gallery 1993 (←)*

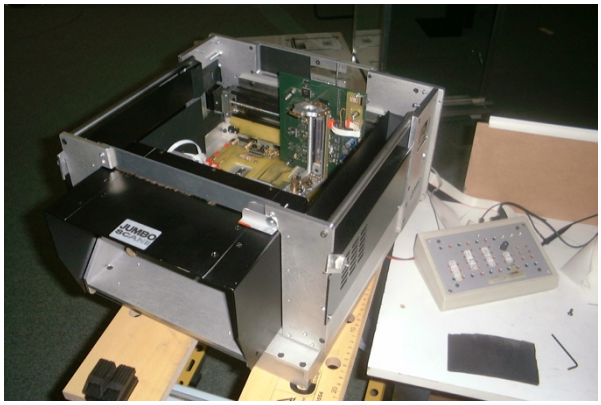


*Figure 7 - Prototype (1999) caméra multispectrale 13 filtres 240 MP invention 1997, décrite dans cette thèse (→)*

La thèse présentée s'inscrit dans un contexte de recherche visant à dépasser les limites actuelles des méthodes d'analyse des œuvres d'art, en cherchant à repousser les frontières de la technologie et de l'interprétation scientifique. Ce travail interdisciplinaire ne se limite pas à la conception d'une caméra multispectrale : il s'attache à démontrer que l'instrumentation et l'algorithme forment un système intégré de production de connaissance. L'objectif central était le développement d'un dispositif inédit, capable de générer des images de 240 millions de pixels avec une précision colorimétrique et spectrale inégalée, tout en conservant une cohérence optique exceptionnelle grâce à l'éclairage collimaté conçu sur mesure. Mais l'innovation ne réside pas seulement dans la performance technique de la caméra ; elle réside surtout dans l'articulation entre cette instrumentation et la méthode d'analyse qui en découle.

Le cœur de cette recherche est en effet la mise au point de la *Layer Amplification Method* (L.A.M.), une méthode de traitement différentiel des données multispectrales permettant de révéler des informations invisibles avec les approches traditionnelles. Contrairement aux techniques classiques - qui reposent sur l'infrarouge ou la radiographie pour sonder les sous-couches - la méthode L.A.M. neutralise les invariants spectraux afin de faire émerger des écarts ténus dans la cohérence picturale. Elle transforme ainsi le paradigme d'analyse : il ne s'agit plus seulement d'« enregistrer » la matière mais de rendre lisible ce qui, dans une image, échappe au régime de visibilité ordinaire. Cette approche renouvelle les cadres de preuve et ouvre une voie épistémologique nouvelle dans l'étude des œuvres peintes.

Les travaux de recherche s'articulent donc autour de trois axes complémentaires : (1) perfectionner les dispositifs d'imagerie multispectrale par l'élaboration d'un système optique et d'une calibration adaptés aux exigences du patrimoine ; (2) exploiter les propriétés physiques des couches picturales

grâce à la lumière collimatée et à la méthode L.A.M., afin de révéler repentirs, *spolveri*, dessins préparatoires ou traces gestuelles ; (3) appliquer ces innovations à l'étude de *La Joconde*, chef-d'œuvre de Léonard de Vinci, afin d'apporter des révélations inédites sur sa technique exécutive. Ces trois dimensions convergent pour défendre une thèse forte : montrer que l'innovation instrumentale et méthodologique, intégrée à une réflexion scientifique sur les conditions de visibilité des œuvres, constitue un véritable apport de recherche en sciences de l'information et de la communication. En ce sens, ce travail vise à démontrer que l'imagerie multispectrale, alliée à la méthode L.A.M., ne relève pas seulement d'une prouesse technique, mais représente une démarche scientifique originale et structurante pour l'étude et la préservation du patrimoine.

**Structure de la thèse**

La thèse s'organise en cinq chapitres qui suivent une progression logique allant de la problématique initiale à l'étude approfondie de *La Joconde*.

**Le premier chapitre** introduit la problématique du *spolvero* et expose les limites des techniques d'imagerie traditionnelles. Il présente la découverte historique du *spolvero* de *La Joconde* grâce à la méthode L.A.M., en montrant comment cette révélation renouvelle les approches de l'histoire de l'art et de la conservation.

**Le deuxième chapitre** est consacré à la conception et à la réalisation d'une caméra multispectrale de 240 millions de pixels, accompagnée d'un système d'éclairage collimaté à l'angle de Brewster. Au-delà de la description instrumentale, il met en évidence le caractère authentiquement scientifique et expérimental de cette démarche, qui relève d'un véritable travail de recherche.

**Le troisième chapitre** présente la méthode L.A.M., en détaillant ses principes, sa validation expérimentale et les révélations qu'elle rend possibles sur *La Joconde*. Cette partie démontre que la méthode L.A.M. n'est pas seulement un outil technique, mais bien une approche épistémologique qui modifie en profondeur notre manière de rendre lisibles les œuvres peintes.

**Le quatrième chapitre** avance des hypothèses explicatives sur les performances de la méthode L.A.M. Il examine les conditions géométriques de l'éclairage, notamment l'intérêt de la lumière collimatée et de l'incidence oblique.

Enfin, **le cinquième chapitre** applique l'ensemble de ces développements à l'étude scientifique de *La Joconde*. Il propose une caractérisation détaillée de la technique exécutive de Léonard de Vinci, en examinant les craquelures, le vieillissement des couches picturales, le dévernissage virtuel, l'identification des pigments, l'analyse des glacis et la mise en évidence de gestes picturaux tels que l'usage des doigts, les hachures ou les grattages.

Cette thèse se situe au croisement de la science et de l'art, en développant des outils et des méthodes adaptés aux enjeux contemporains de l'analyse scientifique des œuvres d'art. Elle explore des approches innovantes qui visent à améliorer la compréhension des chefs-d'œuvre du patrimoine artistique mondial. Ces travaux ouvrent également des perspectives prometteuses, tant pour la recherche scientifique que pour la préservation et la valorisation des œuvres d'art, perspectives qui seront discutées dans la conclusion.

# CHAPITRE 1

## Problématique du *spolvero* sur *La Joconde - Impulsus ad methodum*

« *Nil posse creari de nilo.* »

Lucrèce*, De rerum natura*, I, v. 150 (env. -98 - -55 av. J.-C.)
*(« Rien ne peut naître de rien. »)*

# 1 CHAPITRE 1 - Problématique du *spolvero* sur *La Joconde* - *Impulsus ad methodum*.

## Introduction

L'élaboration de *La Joconde*, commencée à Florence aux alentours de 1503, s'inscrit dans une période de transition majeure des pratiques artistiques, marquée par une intensification des expérimentations techniques au sein des ateliers italiens. Léonard de Vinci, figure emblématique de cette Renaissance scientifique, manifeste dans ses écrits comme dans ses œuvres une attention soutenue aux matériaux, aux supports et aux procédés préparatoires. *La Joconde* ne fait pas exception : elle constitue, à bien des égards, un manifeste pictural où s'entrelacent observation naturaliste, maîtrise optique, et innovation technique.

Le panneau utilisé - un bois de peuplier finement préparé - témoigne d'une volonté de disposer d'un support stable et durable, susceptible d'accueillir une peinture minutieuse reposant sur des couches fines et superposées. Les analyses physico-chimiques et les examens réalisés depuis le début du XXI$^{e}$ siècle, notamment lors de la grande campagne d'étude menée par le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), ont mis en évidence l'extrême sophistication de la stratigraphie picturale : couches d'imprimation (*imprimatura*), dessin sous-jacent, modelés progressifs réalisés en glacis, et fines transitions tonales.

Parmi les éléments fondamentaux de la technique de Léonard figure l'usage d'étapes méthodiques de mise en place, reposant souvent sur des dessins sous-jacents, soit exécutés directement sur le panneau, soit transférés à partir d'un carton. Ce transfert pouvait être réalisé par diverses méthodes - calque, poncif, piquetage, *spolvero*, ou autres - selon la nature du support, la finesse du tracé recherché, et les usages propres à chaque atelier. La présence de transferts par *spolvero*, attestée dans d'autres œuvres de Léonard ainsi que dans celles de ses élèves, suggère fortement que *La Joconde* a elle aussi fait l'objet d'un transfert graphique selon cette même méthode - bien qu'aucune trace directe n'ait pu être mise en évidence jusqu'à présent.

L'étude ici présentée se fonde sur cette hypothèse technique admise mais restée longtemps historiquement invisible, et vise à démontrer, à l'aide de méthodes d'imagerie avancée, que *La Joconde* présente bel et bien les marques d'un *spolvero*, confirmant ainsi l'existence d'un carton préparatoire et renouvelant notre compréhension du processus de création de l'œuvre.

## 1.1 Le *spolvero* : principes et enjeux

La technique de transfert enseignée dans la *bottega* florentine d'Andrea del Verrocchio, où Léonard de Vinci effectua son apprentissage, consistait à réaliser un dessin sur papier, puis à le transférer sur la planche à l'aide de la méthode du *spolvero*. Le terme *spolvero,* au pluriel *spolveri,* provient de l'italien *spolverare*, qui signifie « poudrer », en référence à la manière dont cette technique était traditionnellement mise en œuvre. Le dessin était d'abord réalisé sur un support souple tel que du papier ou du carton, puis perforé avec une aiguille, produisant des trous le long des contours, (voir

Figure 8) et parfois à l'intérieur des formes pour indiquer certains détails. Le dessin ainsi piqué était appliqué sur la planche, et une poudre - noire (noir de fumée ou noir d'os) sur fond clair, ou blanche (craie ou blanc de plomb) sur fond sombre - était tamponnée à travers les trous, laissant apparaître sur le support une série de points. Ces points étaient ensuite reliés avec un médium sec ou fluide afin de reconstituer les lignes du dessin original. Selon la technique utilisée, l'artiste peut les relier avec un médium sec (comme le graphite, la pierre noire, ou le fusain) ou avec un médium fluide, tel qu'un pinceau et un pigment dilué (voir Figure 9). Ce travail de liaison, souvent réservé à l'auteur du dessin, était indispensable à l'intelligibilité de l'ensemble. Cette méthode est décrite de manière détaillée par Cennino Cennini au XVe siècle (Broecke, 2015).

Une observation vient nuancer ce protocole : les feuilles conservées au musée du Louvre (*Portrait d'Isabelle d'Este*) ou au musée Condé à Chantilly (*La Joconde* nue) présentent des perforations nettes, mais ne sont pas maculées de poudre, bien qu'elles aient manifestement servi de modèles pour un transfert. Cette propreté suggère que le dessin original n'était pas utilisé pour l'opération de poudrage. Deux hypothèses sont envisageables :

- soit une feuille de papier huilé, translucide, était placée sur le dessin pour permettre la perforation - les deux ensemble - par transparence, puis utilisée seule pour le transfert après avoir été retirée,
- soit une feuille vierge était placée sous le dessin, et les deux étaient perforés ensemble ; seul le feuillet vierge, devenu poncif, était ensuite appliqué sur la planche pour le *spolvero*, tandis que le dessin original était mis de côté, à l'abri de toute manipulation.

L'usage du *spolvero* présente plusieurs avantages. Il permet une reproduction fidèle d'un modèle préparatoire (carton), souvent exécuté avec grand soin, et dont la précision est essentielle à la réussite du tableau. Il autorise aussi des adaptations ou des corrections entre le dessin et la peinture, en fonction des choix de l'artiste ou des contraintes du support. Enfin, il constitue une pratique collective, compatible avec l'organisation du travail dans un atelier, où plusieurs mains pouvaient intervenir à partir d'un même modèle.

Cette méthode est attestée dans plusieurs portraits peints par Léonard, notamment : *La Dame à l'Hermine* (Cotte, 2014), *Ginevra de' Benci* (Walmleys, 2014) (Bull, 1992) et *La Belle Ferronnière* (Ravaud and Eveno, 2014). Ce recours est en effet largement attesté dans l'atelier léonardien, notamment dans les dessins préparatoires du *Portrait d'Isabelle d'Este* (voir Figure 8) ou du *Saint Jean-Baptiste*. Elle est également visible dans certaines œuvres de ses élèves ou collaborateurs. Il est surprenant qu'aucune trace de *spolvero* n'ait été observée jusqu'à récemment sur *La Joconde*.

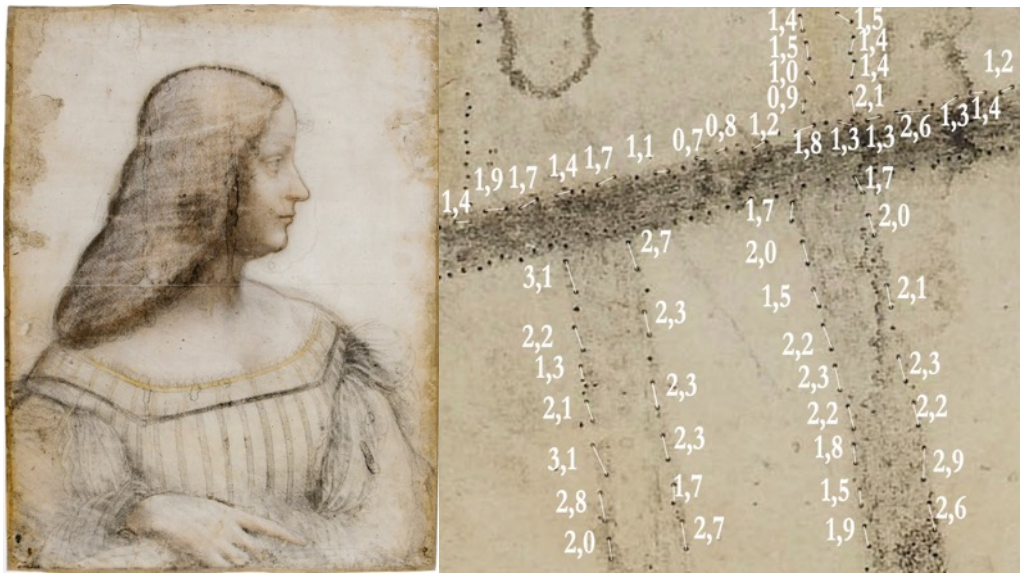



*Figure 8 - Léonard de Vinci. (Vinci, 1452 - Amboise, 1519) Portrait d'Isabelle d'Este, vers 1499-1500 (Détail de la robe et mesures des écarts des points du spolvero en mm) Pierre Noire, sanguine et estompe, craie ocre, rehauts de blanc. H : 61 cm, L : 46,5 cm. Paris musée du Louvre, département des Arts Graphiques. MI 753.*

*Figure 9 - Processus de réalisation du* spolvero
*Points après transfert (←) ; points reliés par un médium sec (centre) ; points reliés par un médium fluide (→)*

Il était donc historiquement attendu que *La Joconde* ait elle aussi fait l'objet d'un transfert par *spolvero*.

Dans le catalogue de l'exposition Léonard de Vinci (Louvre, 2019), les auteurs de l'étude technique affirment même que le tableau devait comporter un *spolvero* [2] (Eveno et al., 2019), bien que celui-ci n'ait jamais été observé jusqu'alors par le C2RMF. Cette absence d'identification ne saurait être interprétée comme une preuve de son inexistence, mais plutôt comme une limite des techniques d'imagerie mobilisées par le C2RMF jusqu'ici.

C'est précisément à cette impasse méthodologique que répond la présente recherche, en proposant un nouveau protocole d'acquisition d'images fondé sur la réflectographie multispectrale et la méthode L.A.M., qui permet de franchir les seuils de visibilité imposés par les couches picturales opaques aux images infrarouges.

[2] For the Mona Lisa, the existence of a transfer is not assured, but the usual practice for portraits strongly suggests it, at least for the head. (2019)
Des images de spolvero visibles sur La Joconde avaient été publiées dès 2015 dans l'ouvrage Lumière on Mona Lisa - Hidden portraits (Pascal Cotte, Vinci Editions, 2015), notamment pages 60, 61, 65, 68, 70, 76, 93, 120 et 140. Elles étaient présentées sans explication méthodologique, le contexte de publication ne permettant pas d'entrer dans les détails techniques. Cet ouvrage a été transmis au C2RMF peu après sa publication, sans qu'il en ait été fait mention dans les publications ultérieures du laboratoire.

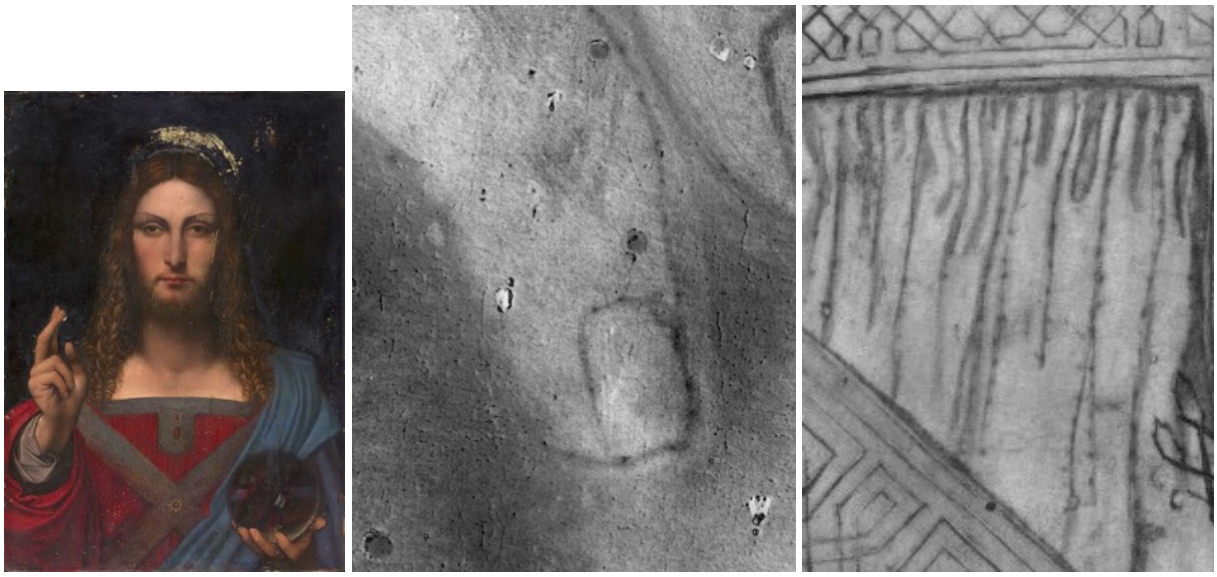


*Figure 10 - Découverte du* spolvero *sur le* Salvator Mundi *dite version Ganay, huile sur bois, 68,3 x 48,9 cm, coll. Privée. Numérisée en multispectral en 2012 puis en 2020 après restauration. Images L.A.M #18 d 12-8-1 et IR 1050 nm.*

## 1.2 Les obstacles contemporains à la détection des *spolveri*

Si la technique du *spolvero* est bien connue des historiens de l'art, sa détection directe sur les peintures anciennes pose des difficultés considérables, en particulier lorsqu'il s'agit d'œuvres aussi complexes et stratifiées que *La Joconde*. Ces obstacles tiennent à la fois à la nature optique des matériaux utilisés, à l'évolution physico-chimique des couches picturales au fil des siècles, et aux limites des outils d'imagerie disponibles.

La première difficulté réside dans l'épaisseur et l'opacité des couches picturales. Les *spolveri* sont appliqués directement sur la préparation blanche du panneau, souvent en une poudre noire extrêmement fine. Cette trace initiale est ensuite recouverte de plusieurs couches de peinture, dont certaines, comme le blanc de plomb (cérusite), possèdent un pouvoir masquant très élevé, notamment dans le proche infrarouge. Cette superposition rend invisible le point initial, même en réflectographie IR, dès lors que l'épaisseur totale dépasse quelques dizaines de microns.

La seconde difficulté est d'ordre matériel : la taille des points de *spolvero* est souvent inférieure à 100 µm, avec un contraste très faible par rapport au fond. Toute diffusion de lumière dans les couches supérieures, toute microfissuration, ou toute altération de surface (craquelures, couches de vernis oxydées) contribue à atténuer, disperser ou masquer ces repères. Le vieillissement naturel des matériaux, le jaunissement des vernis, ainsi que les restaurations anciennes peuvent également effacer partiellement ou totalement les traces originales.

Une difficulté supplémentaire tient au faible contraste entre la poudre du *spolvero* et le fond sur lequel elle est appliquée. Lorsque le poncif est réalisé en noir sur une préparation sombre - par exemple rougeâtre ou brun ferrugineux -, les points sont difficilement perceptibles à l'œil nu, même avant recouvrement. Inversement, un *spolvero* réalisé en craie blanche sur un fond sombre peut présenter une réflectivité différentielle trop faible, notamment dans l'infrarouge. Dans les deux cas, le point devient quasi indiscernable de son support, y compris avec des dispositifs d'imagerie sensibles.

Enfin, certaines techniques d'imagerie elles-mêmes sont mal adaptées à la détection de motifs aussi fins. Le compromis entre résolution spatiale, profondeur de pénétration et contraste spectral limite la

capacité des dispositifs standards à isoler les points du *spolvero* du bruit de fond global du matériau pictural.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la recherche présentée ici : en tenant compte des propriétés optiques des matériaux et des seuils de pénétration spécifiques à chaque longueur d'onde, il est possible de mettre en place un protocole multispectral adapté à la recherche de micro-traces sous-jacentes. Ce protocole repose notamment sur l'analyse différentielle entre bandes spectrales, principe au cœur de la méthode L.A.M., que nous exposerons après avoir examiné les limites des techniques classiques.

## 1.3 Limites des techniques d'imagerie traditionnelles

Depuis les premières campagnes d'imagerie scientifique appliquées aux œuvres d'art, diverses techniques non invasives ont été mobilisées pour révéler les dessins sous-jacents, les repentirs, les restaurations ou les structures cachées des tableaux. Parmi celles-ci, la réflectographie infrarouge, la radiographie par rayons X, la fluorescence ultraviolet (FUV) et l'émissiographie X ont chacune apporté des contributions importantes à la connaissance des œuvres de Léonard de Vinci, et de *La Joconde* en particulier.

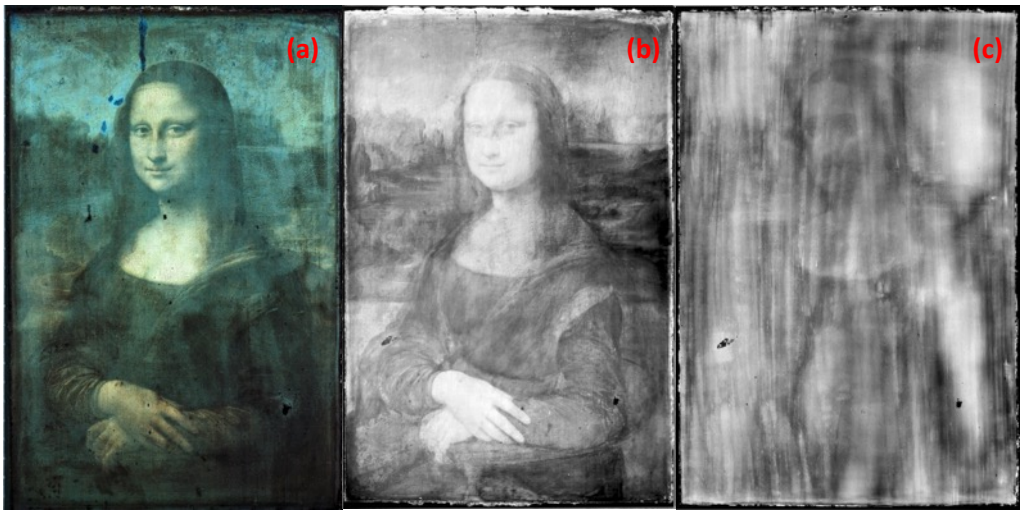



*Figure 11 - (a) Fluorescence U.V. ; (b) Emissiographie X ; (c) Rayons X* © Louvre, c2rmf

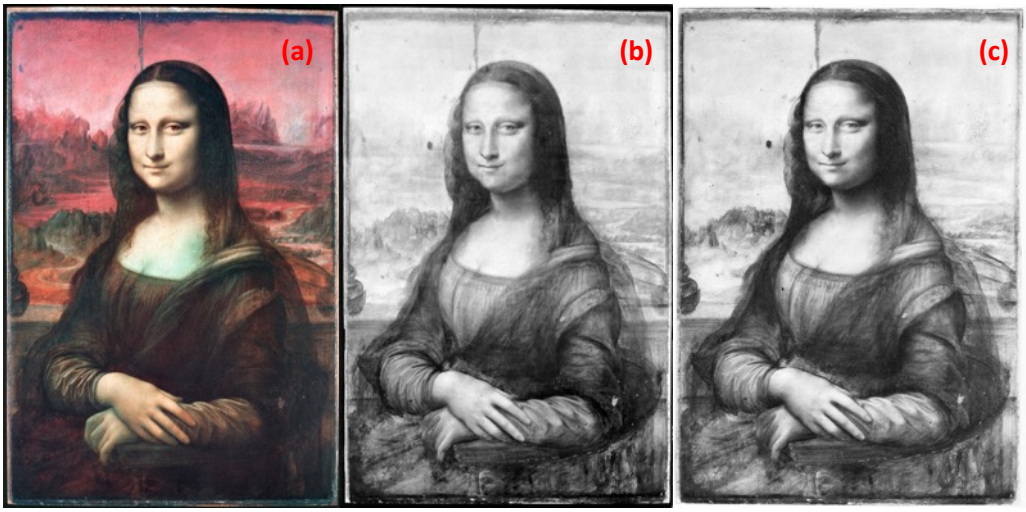



*Figure 12 - (a) Fausse-couleur infrarouge ; (b) Infrarouge caméra Vidicon 2000 nm; (c) Infrarouge Osiris 1700 nm* © Louvre, c2rmf

Cependant, aucune de ces méthodes n'a permis jusqu'à présent de mettre en évidence la présence d'un *spolvero* sur *La Joconde*, malgré l'attente historiographique clairement formulée dans les publications du C2RMF (voir note 2 page 10). Cette absence de résultats n'est pas liée à un défaut d'interprétation, mais aux limites intrinsèques de ces techniques face à la configuration physico-chimique très spécifique du tableau : accumulation de couches picturales opaques, usage abondant de blanc de plomb, microstructure du support, dimensions extrêmement réduites des points à détecter.

Il importe donc d'examiner, de manière comparative et critique, les apports et les insuffisances de ces techniques face à la problématique du *spolvero*. Les exemples iconographiques qui suivent illustrent, pour chacune d'elles, leur champ d'efficacité mais aussi leur incapacité à franchir les seuils de visibilité nécessaires à la détection des micro-traces laissées par le poncif. Cette mise en perspective permettra d'introduire la démarche alternative développée dans ce travail, fondée sur l'imagerie multispectrale et l'analyse différentielle des couches réfléchies.

### 1.3.1 Usage et limites de la réflectographie infrarouge dans l'analyse des œuvres d'art

Évolution des dispositifs infrarouges : La réflectographie infrarouge est une technique traditionnelle pour observer le *spolvero* sous les peintures. Dans les années 1950, des films photographiques (850 nm) étaient utilisés, puis dans les années 1990, des caméras analogiques basées sur le tube Vidicon (1100-2000 nm). L'arrivée du CCD (380-1050 nm), suivi du capteur *InGaAs* (arséniure de gallium et indium) bande 900-1700 nm, puis du capteur *InSb* (antimoniure d'indium) bande 1000-2450 nm ont amélioré les performances des caméras infrarouges, permettant de voir toujours plus loin dans l'infrarouge.
Parallèlement, les caméras thermiques - reposant sur des capteurs *HgCdTe* ou microbolomètres non refroidis - ont permis d'explorer l'infrarouge moyen (3-5 µm) et lointain (8-14 µm), en révélant des signatures thermiques liées aux propriétés physiques et radiatives des matériaux. Bien que moins utilisées en muséographie classique, elles ont été expérimentées dans certains laboratoires pour cartographier la structure interne des panneaux ou détecter des restaurations anciennes (Mercuri et al., 2014).

La réflectographie infrarouge est fondée sur la capacité de certaines longueurs d'onde du proche infrarouge à traverser partiellement les couches picturales opaques à la lumière visible, elle permet, dans de nombreux cas, de révéler des tracés préparatoires exécutés au carbone, à la pierre noire ou à l'encre.

Lors de l'étude complète de *La Joconde*, qui a bénéficié des moyens techniques les plus avancés disponibles en 2004-2005, les investigations infrarouges du Louvre/C2RMF ont mis en évidence certaines restaurations, une retouche sur les doigts de la main gauche, des détails de construction de l'accoudoir et un entrelacs sous le voile de l'épaule gauche ; mais aucune mention de la présence de *spolvero* n'a été rapportée dans leur publication (Mohen, 2006).

Représentation dominante : Dans le domaine de l'analyse des œuvres d'art, il est largement admis que seuls les rayonnements infrarouges peuvent pénétrer la couche picturale (Gargano, Ludwig et Poldi, 2007) (Delaney et al., 2016), alors que le rayonnement visible demeure en surface. Les laboratoires muséaux ont ainsi recours à des caméras infrarouges fonctionnant à des longueurs d'onde de 1200 nm ou 2200 nm, certaines allant jusqu'à 3000 nm et au-delà, ou encore le rayonnement thermique (Ambrosini *et al.*, 2010).
Une idée reçue persiste dans la littérature technique et la vulgarisation muséale selon laquelle « plus la longueur d'onde est grande, plus l'on voit en profondeur » (Walmsley, Fletcher et Delaney, 1992;

Weiner, 1998; Daffara et Fontana, 2011). Cette formulation simplificatrice repose sur une base physique partiellement fondée - la diminution de la diffusion et la croissance concomitante de l'absorptance avec l'augmentation de la longueur d'onde - mais elle néglige plusieurs facteurs critiques qui limitent en pratique l'efficacité de cette approche.

Complexité des mécanismes de diffusion : D'une part, cette croyance généralise les effets bien connus de la diffusion de Rayleigh (valable pour des particules très inférieures à la longueur d'onde), sans tenir compte du fait que dans les couches picturales, composées de pigments granulaires, **la diffusion de Mie prédomine**. Or, dans ce régime optique, la dépendance à la longueur d'onde est complexe, **non monotone**, et fortement influencée par la taille, la forme et la distribution des particules, comme nous le verrons au chapitre 4. En conséquence, l'augmentation de la longueur d'onde ne garantit pas un gain significatif de transparence, notamment dans des matériaux fortement diffusants ou absorbants.

Dépendance au contraste d'absorption : D'autre part, l'efficacité de la réflectographie dépend du contraste d'absorption entre les différents matériaux. Dans le cas de *La Joconde*, la présence massive de blanc de plomb (cérusite) dans les couches préparatoires et les couches superposées crée une forte réflectance dans l'infrarouge, qui sature localement le signal et masque les micro-variations liées aux *spolveri*, même si ceux-ci ont été tracés à l'aide de pigments absorbants comme le carbone ou le noir d'os.

Limites optiques imposées par la diffraction : Une limite fondamentale de l'imagerie infrarouge réside dans la diffraction, phénomène inhérent à toute propagation lumineuse à travers une ouverture. Plus la longueur d'onde est grande, plus la taille de la tache de diffraction augmente, ce qui dégrade la résolution spatiale. Ce flou optique devient particulièrement pénalisant au-delà de 1500 ou 1700 nm, et ce malgré l'usage d'optiques de haute qualité. Le diamètre de la tache d'Airy, qui conditionne le pouvoir séparateur d'un système optique, est donné par la relation :

$$Tache\ d'Airy = 2.44\ \frac{\lambda}{D} \qquad \textit{Eq. ( 1 )}$$

$\lambda$ est la longueur d'onde de la lumière utilisée (en mètres) et $D$ est le diamètre de l'ouverture de l'objectif (en mètres). Cette dépendance linéaire explique pourquoi, selon le critère de Rayleigh, la résolution dans l'infrarouge (3000 nm) peut être jusqu'à cinq fois inférieure à celle obtenue dans le visible (560 nm) (voir Tableau 1). À cela s'ajoutent les limites technologiques des capteurs *InGaAs* : bruit électronique, dynamique réduite et aberrations chromatiques des optiques SWIR.

| | Ø | P/mm | Ø | P/mm | Ø | P/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nm | Airy | | Rayleigh | | Sparrow | |
| | µm | | µm | | µm | |
| 400 | 26,0 | 38 | 13 | 77 | 11 | 91 |
| 440 | 28,6 | 35 | 14 | 70 | 12 | 83 |
| 480 | 31,2 | 32 | 16 | 64 | 13 | 76 |
| 520 | 33,8 | 30 | 17 | 59 | 14 | 70 |
| **560** | **36,4** | **27** | **18** | **55** | **15** | **65** |
| 600 | 39,0 | 26 | 20 | 51 | 16 | 61 |
| 640 | 41,6 | 24 | 21 | 48 | 17 | 57 |
| 680 | 44,2 | 23 | 22 | 45 | 19 | 54 |
| 720 | 46,8 | 21 | 23 | 43 | 20 | 51 |
| 760 | 49,5 | 20 | 25 | 40 | 21 | 48 |
| 800 | 52,1 | 19 | 26 | 38 | 22 | 46 |
| 900 | 58,6 | 17 | 29 | 34 | 25 | 41 |
| 1 000 | 65,1 | 15 | 33 | 31 | 27 | 37 |

| | Ø | P/mm | Ø | P/mm | Ø | P/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nm | Airy | | Rayleigh | | Sparrow | |
| | µm | | µm | | µm | |
| 1 200 | 78,1 | 13 | 39 | 26 | 33 | 30 |
| 1 400 | 91,1 | 11 | 46 | 22 | 38 | 26 |
| 1 600 | 104,1 | 10 | 52 | 19 | 44 | 23 |
| 1 800 | 117,1 | 9 | 59 | 17 | 49 | 20 |
| 2 000 | 130,1 | 8 | 65 | 15 | 55 | 18 |
| 2 200 | 143,1 | 7 | 72 | 14 | 60 | 17 |
| 2 400 | 156,2 | 6 | 78 | 13 | 66 | 15 |
| 2 600 | 169,2 | 6 | 85 | 12 | 71 | 14 |
| 2 800 | 182,2 | 5 | 91 | 11 | 77 | 13 |
| **3 000** | **195,2** | **5** | **98** | **10** | **82** | **12** |
| 3 200 | 208,2 | 5 | 104 | 10 | 87 | 11 |
| 3 400 | 221,2 | 5 | 111 | 9 | 93 | 11 |
| 3 800 | 247,3 | 4 | 124 | 8 | 104 | 10 |

*Tableau 1 - Calculs de la résolution théorique pixels/mm - focale 210 mm - N=5.6 pour le rayonnement visible et infrarouge de 400 nm à 3800 nm. Diamètres de la tache d'Airy, critère de Rayleigh, critère de Sparrow et nombre de pixels/mm.*

La méthode L.A.M., qui sera développée plus loin, se positionne ainsi comme un apport complémentaire à ces approches traditionnelles. Elle exploite les propriétés de pénétration du rayonnement visible dans les couches picturales, contrairement à l'idée reçue d'une réflexion strictement superficielle. Comme il sera démontré (voir chapitre 3), cette propriété permet d'obtenir des images de meilleure qualité, tant en résolution spatiale qu'en dynamique, et s'avère particulièrement adaptée à l'étude de couches picturales fines, comme celle de *La Joconde*.

Dans le cas spécifique de *La Joconde*, les images infrarouges acquises lors des campagnes du C2RMF montrent certaines lignes de contours et quelques masses dessinées, mais aucune trace ponctuelle identifiable comme un *spolvero*. Les figures suivantes, publiées par le Louvre et le C2RMF présentent des images infrarouges où l'on observe aucun point dans la zone de la tête - zone pourtant propice à leur présence.

**Illustrations comparées :**

Plusieurs campagnes d'imagerie infrarouge de *La Joconde* ont été publiées par le musée du Louvre et le C2RMF, principalement dans l'ouvrage de référence *Mona Lisa Inside the Painting* (Abrams, 2006). Ces images, de très haute qualité, offrent un panorama représentatif des approches techniques mises en œuvre : photographie NIR avec capteur CCD, réflectographie IR à tube Vidicon (voir l'image entière Figure 12 (b) page 12), et images issues de la caméra multispectrale développée par l'auteur. À cela s'ajoute une publication plus récente du C2RMF dans le catalogue de l'exposition Léonard de Vinci (Hazan, 2019), utilisant une caméra Osiris haute résolution (16 MP) (voir l'image entière Figure 12 (c) page 12).
Les figures suivantes présentent uniquement des détails centrés sur la tête du personnage, zone dans laquelle les *spolveri* sont invisibles.

*Figure 13 - Détail du front de* La Joconde *- image couleur D65, caméra multispectrale.* © P. Cotte

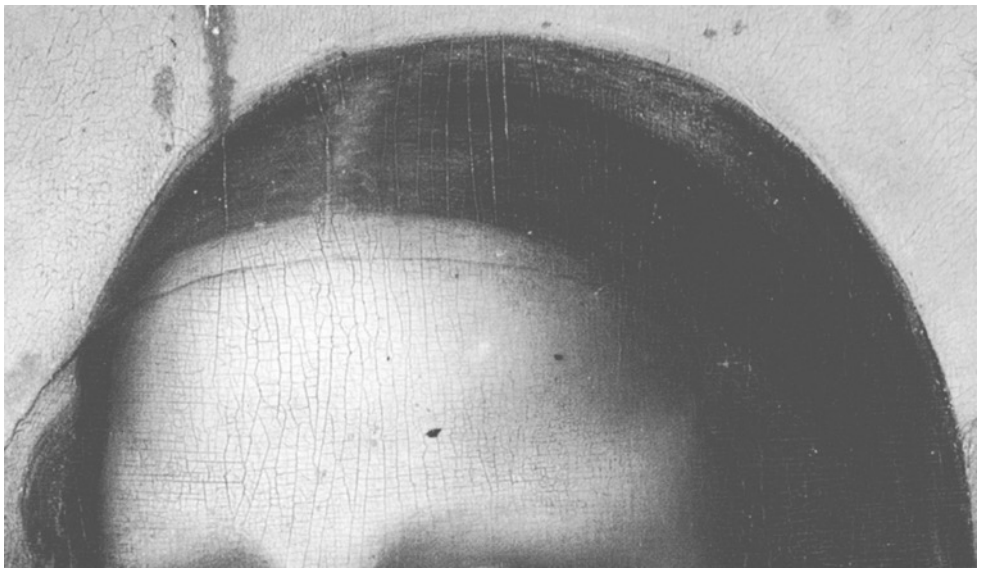


*Figure 14 - Détail de la tête, photographie NIR (900-1000 nm), capteur CCD © Louvre/c2rmf*
*Source : E. Martin et al.,* The Painter's palette*, in* Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams (2006), pl. 13, p. 61*

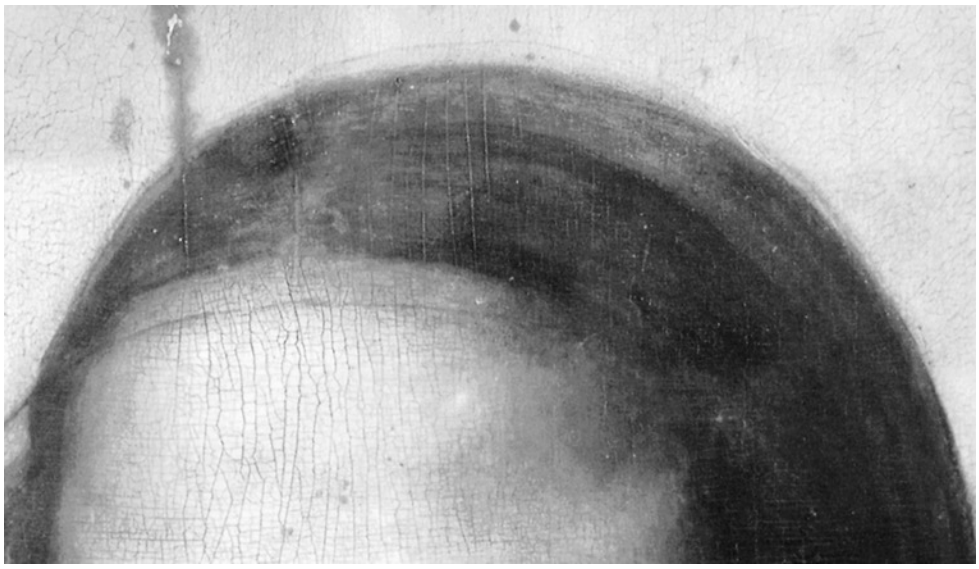


*Figure 15 - Détail de la tête, réflectographie IR Vidicon (1800-2000 nm), caméra Hamamatsu C2400-03 © Louvre/c2rmf*
*Source : E. Lambert,* Photographic Imaging*, in* Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams (2006), pl. 24, p. 81*

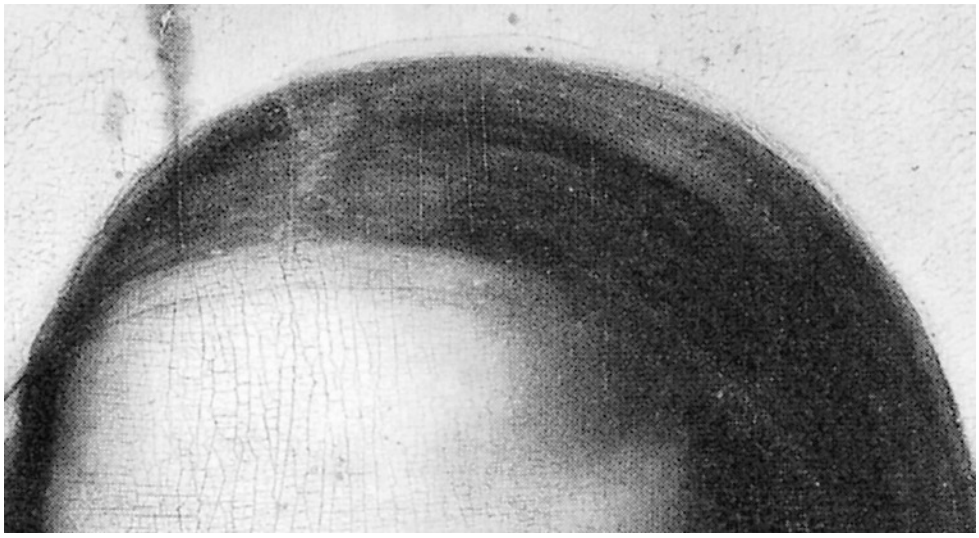


*Figure 16 - Détail de la tête, réflectographie infrarouge haute résolution (caméra OSIRIS, 16 MP) © Louvre/c2rmf*
*Source : L. Frank,* Catalogue de l'exposition Léonard de Vinci*, Hazan (2019), p. 226*

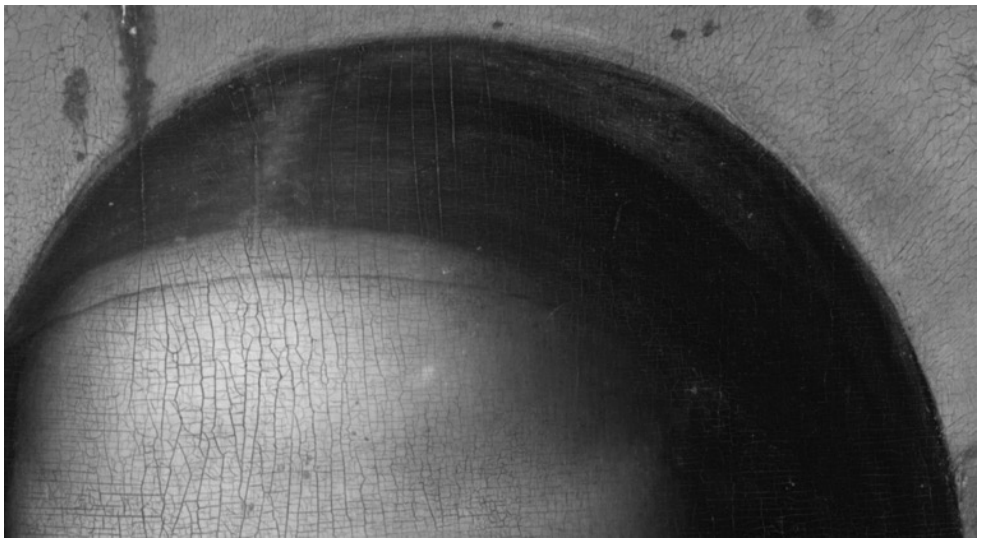


*Figure 17 - Détail de la tête, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) à 800 nm* © P. Cotte

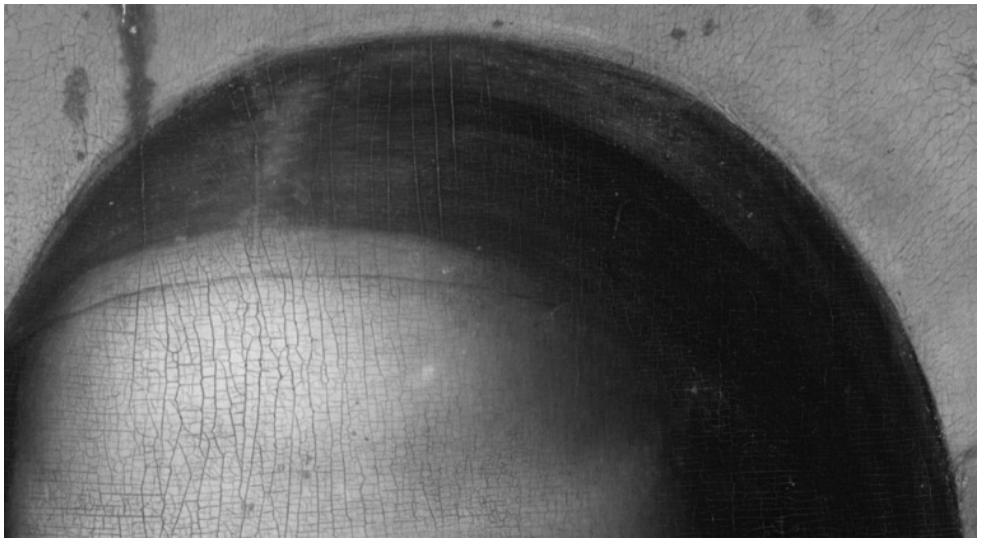


*Figure 18 - Détail de la tête, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) à 900 nm* © P. Cotte

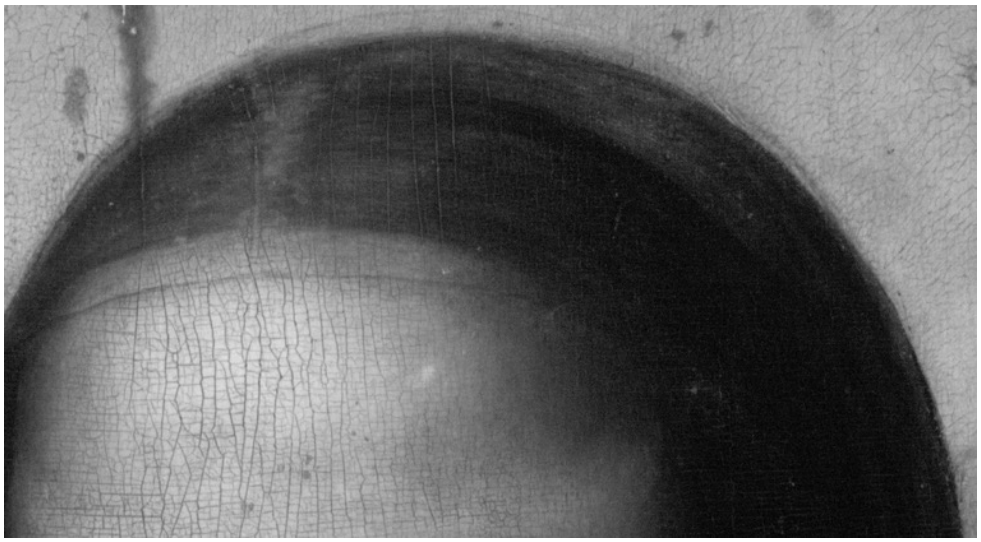


*Figure 19 - Détail de la tête, image multispectrale proche Infrarouge (NIR) à 1000 nm* © P. Cotte

Malgré la diversité des dispositifs utilisés, aucune de ces images ne montre les *spolveri*, ni les marques graphiques visibles par d'autres moyens sur la droite de la tête, dans le ciel. Même la caméra Vidicon, pourtant utilisée avec une très longue longueur d'onde (jusqu'à 2000 nm), ne révèle ni ces points, ni les lignes qui les relient.

La réflectographie IR réalisée à l'aide d'une caméra Hamamatsu C 2400-03 IR équipée d'un tube Vidicon N 2606-06, sensible jusqu'à 2000 nm et offrant une dynamique de 46 dB[3]. Plusieurs centaines de clichés (600 × 600 pixels), pris à quelques centimètres d'intervalle, ont été assemblés pour créer une image complète du portrait à très haute définition (Mottin, 2006). Cette définition en pixels équivaut à celle de la caméra multispectrale de cette thèse et a permis d'imprimer un format de 300 × 450 mm représentant uniquement le visage de *La Joconde* (Lambert, 2006). (voir Figure 12b et Figure 15). Le résultat final, bien qu'impressionnant par sa finesse sur certains détails (notamment les craquelures du visage), souffre d'un flou structurel en raison du critère de Rayleigh : plus la longueur d'onde est élevée, plus la résolution diminue, ce qui affecte directement la visibilité des motifs fins. Certains détails apparaissent flous, d'autres disparaissent littéralement sous les couches picturales.

La réflectographie publiée en 2019 par le Louvre et le C2RMF, obtenue avec la caméra Osiris haute définition[4], montre une texture de réseau de craquelures très différente de celle observée sur les images Vidicon, mais ne révèle pas davantage les *spolveri*. La nature des capteurs modernes (*InGaAs*) n'élimine donc pas les limites optiques fondamentales liées à l'interaction rayonnement-couche picturale.

En conclusion, ni la réflectographie IR longue (Vidicon 2000 nm), ni la photographie NIR, ni même la caméra multispectrale traditionnelle ou la haute résolution moderne ne permettent de révéler les *spolveri* sur *La Joconde*. Ces images confirment les limites structurelles de l'imagerie infrarouge et la nécessité de recourir à une méthode différente pour franchir le seuil d'invisibilité imposé par la matière même de la peinture.

Cette absence ne doit pas être interprétée comme une preuve de non-existence, mais comme le résultat des limites physiques et optiques de la réflectographie IR, qui se révèle parfois inadaptée à la détection de motifs ponctuels de très faible contraste dans des couches fortement réfléchissantes.

### 1.3.2 La réflectographie infrarouge fausse couleur (IRFC).

Enfin, certaines variantes d'imagerie, comme les images en fausse couleur infrarouge (IRFC), ont également été appliquées à *La Joconde*. Historiquement, ce type de rendu a d'abord été obtenu à l'aide de films photographiques inversibles trichromes sensibles au proche infrarouge, comme les Kodak *Aerochrome* (EIR), largement utilisés jusqu'au début des années 2000. Ces films réalisaient une réassignation spectrale préprogrammée : l'infrarouge était restitué en rouge, le rouge en vert, et le vert en bleu. Ce procédé permettait de révéler certaines hétérogénéités de surface, des retouches ou des matériaux fortement absorbants dans le proche infrarouge, en leur conférant des teintes caractéristiques.

Dans le cas présent, toutefois, l'image IRFC a été produite numériquement à partir d'une photo numérique RGB et une image infrarouge : le canal rouge a été remplacé par l'infrarouge, le vert par le rouge visible, et le bleu par le vert visible. Cette recomposition chromatique permet de visualiser les

[3] http://alacron.com/clientuploads/directory/Cameras/HAMAMATSU/c2741-03-Datasheet.pdf
[4] https://c2rmf.fr/actualite/reflectographie-infrarouge

différences de réponse spectrale sous forme de contrastes de couleur, exploitables pour la détection de zones de repeints ou de certains pigments.

*Figure 20 - Détail de la tête, image en Fausse-couleur infrarouge © Louvre/c2rmf*
*Source : E. Lambert,* Photographic Imaging*, in* Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams (2006), pl. 22, p. 78*

Cependant, malgré son intérêt pour les analyses globales, l'IRFC - qu'elle soit analogique ou numérique - ne permet pas de distinguer des micro-éléments ponctuels comme les *spolveri*. Sa logique de représentation repose sur des variations spectrales étendues, et non sur des détails sub-picturaux localisés. Dans le cas de *La Joconde*, aucune image IRFC, quelle qu'en soit l'origine, n'a permis de révéler de traces préparatoires. Voir l'image entière Figure 12a page 12.

### 1.3.3 Radiographie par rayons X

La radiographie aux rayons X demeure une technique largement employée dans l'étude des œuvres peintes. Elle permet de visualiser les différences d'épaisseur, de densité et de composition des matériaux, en exploitant l'absorption différentielle des rayonnements X par les éléments chimiques présents dans les couches picturales et le support. Cette méthode est particulièrement sensible aux pigments contenant des éléments à numéro atomique élevé, tels que le blanc de plomb (cérusite), le vermillon (sulfure de mercure) ou certaines terres ferrugineuses.
Dans le cas de *La Joconde*, la radiographie fut utilisée dès les années 1950, sous l'impulsion de Madeleine Hours, alors responsable du laboratoire du musée du Louvre (Hours, 1964). Les premières images radiographiques du tableau ont constitué un jalon fondateur dans le développement de l'imagerie scientifique appliquée au patrimoine, démontrant la puissance des rayons X pour accéder, sans contact, aux structures internes d'une œuvre. Depuis lors, la radiographie a été régulièrement mobilisée dans les campagnes d'examen du tableau.

L'image publiée dans *Mona Lisa - Inside the Painting* a été obtenue par stratiradiographie, une méthode particulière consistant à faire varier légèrement la position de la source de rayons X pendant l'acquisition. Ce déplacement permet de rendre floue l'image du support en bois, tout en renforçant

la lisibilité des structures appartenant à la couche picturale. La stratiradiographie vise ainsi à atténuer l'influence visuelle du panneau et à privilégier les éléments liés à la matière peinte.
Dans *La Joconde*, cette technique met en évidence avec clarté les zones riches en blanc de plomb, notamment au niveau du front, du nez et du décolleté, où l'opacité est renforcée par l'absorption intense des rayons X. En revanche, aucune trace de *spolvero* n'est visible. Cette absence est attendue : les *spolveri*, réalisés avec du noir de fumée, du charbon ou du noir d'os - matériaux à très faible densité atomique - n'absorbent pas significativement les rayons X et ne génèrent donc aucun contraste perceptible dans l'image.
De plus, malgré le floutage partiel du support, la stratiradiographie intègre l'ensemble des strates en superposition, sans profondeur de champ ni possibilité de séparation optique entre les couches. La résolution spatiale de cette technique, quoique suffisante pour détecter des repentirs matériels ou des modifications de forme, ne permet pas d'isoler des micro-traces ponctuelles telles que les points de *spolvero*, dont la taille inférieure peut être à 100 µm et la faible densité les rendent invisibles au sein du signal global. Celui-ci est dominé par la réponse des pigments plombifères et des structures opaques en masse, dans laquelle les repères carbonés sont totalement noyés.

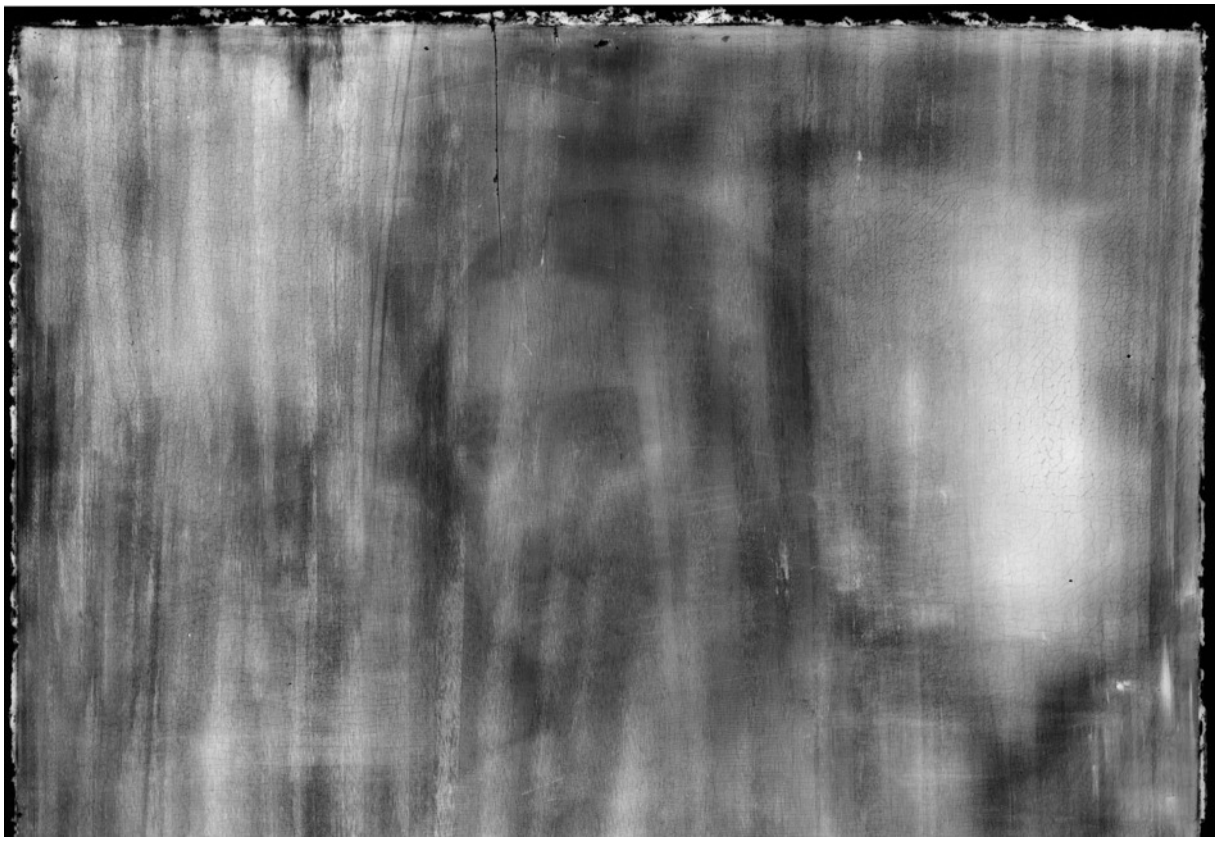


*Figure 21 - Détail radiographique de la tête de* La Joconde *© Louvre/c2rmf*
*Source : E. Ravaud,* The complex system of fine cracks*, in* Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams (2006), pl. 8, p. 40*

Ainsi, comme pour les autres techniques d'imagerie traditionnelles examinées dans ce chapitre, la radiographie X - même optimisée par la stratiradiographie - n'offre aucun accès aux tracés préparatoires de type *spolvero*. Elle conserve néanmoins une place essentielle dans le diagnostic des œuvres : analyse des matériaux métalliques, visualisation des repentirs profonds, étude de l'état structurel du support, autant de domaines où cette technique reste irremplaçable. Voir l'image entière Figure 11c page 12.

### 1.3.4 Émissiographie X

L'émissiographie X est une technique d'imagerie utilisée en complément de la radiographie. Elle repose sur l'enregistrement des électrons secondaires émis par la couche picturale superficielle lors de son exposition à un rayonnement X de haute énergie. Contrairement à la radiographie, qui capte la transmission globale du faisceau à travers toute l'œuvre, l'émissiographie enregistre uniquement l'émission locale de la surface, à l'aide d'un film monocouche placé au contact direct de la peinture.

Le contraste obtenu dépend du rendement de conversion des photons X en électrons secondaires, qui est d'autant plus élevé que les matériaux de surface contiennent des éléments chimiques à numéro atomique élevé, comme le plomb ou le mercure. En pratique, on utilise souvent l'image inversée (positif) pour obtenir un rendu visuel similaire à celui de la radiographie : les zones riches en plomb apparaissent en clair, facilitant la lecture comparative.

Cette technique permet donc une cartographie spécifique de la seule couche picturale superficielle, révélant les restaurations, les repeints, ou les hétérogénéités de composition.

Cependant, dans le cas de *La Joconde*, aucune trace de *spolvero* n'est visible. Ce résultat est cohérent avec la nature même du poncif, constitué de poudres légères à base de carbone ou de noir d'os, dont l'émission X est trop faible pour impressionner le film. En outre, l'épaisseur des vernis, multiples et oxydés, agit comme un écran atténuateur, réduisant le contraste de l'image et diminuant encore la visibilité de micro-traces telles que les *spolveri*.

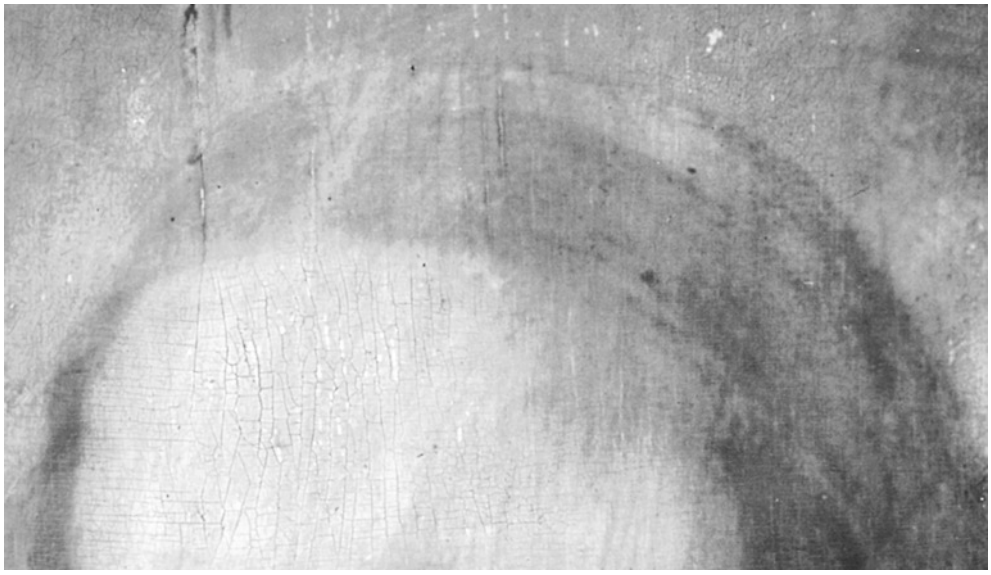


*Figure 22 - Détail de la tête, Émissiographie X. © Louvre/c2rmf*
*Source : E. Ravaud,* Radiography, *in* Mona Lisa Inside the Painting, *Abrams (2006), pl. 25, p. 82*

Mise en évidence de divergences d'émissivité. Absence complète de repères de *spolvero*.

En résumé, l'émissiographie X fournit une image sensible aux matériaux lourds en surface, utile à l'évaluation de l'état de conservation, mais se révèle inapte à la détection des *spolveri* en raison de la nature des matériaux employés et des conditions d'acquisition. Voir l'image entière Figure 11b page 12.

### 1.3.5 Fluorescence ultraviolet (FUV)

La fluorescence ultraviolet (FUV) est une technique d'imagerie reposant sur l'excitation des matériaux de surface par une lumière UV, généralement autour de 365 nm, et sur l'enregistrement de la lumière réémise dans le visible. Cette méthode permet de détecter les différences de composition dans les vernis, les retouches ou certains pigments anciens, en révélant leur réponse photoluminescente caractéristique.

Très utilisée pour évaluer l'état de conservation d'un tableau, la FUV met en évidence les zones de restaurations récentes, les hétérogénéités de liant, et les altérations de surface invisibles à l'œil nu. Elle est particulièrement sensible aux matériaux organiques oxydés, qui apparaissent en brun ou en vert, et aux zones de repeint, souvent plus sombres ou opaques.

Cependant, la FUV n'a aucune capacité de pénétration dans les couches picturales : elle enregistre uniquement la réponse de la surface exposée. Les *spolveri*, recouverts de plusieurs couches de peinture, sont totalement inaccessibles à cette méthode. De plus, les poudres utilisées pour le poncif (carbone, noir d'os) n'émettent pas de fluorescence notable, ce qui rend leur détection impossible même s'ils affleuraient la surface.

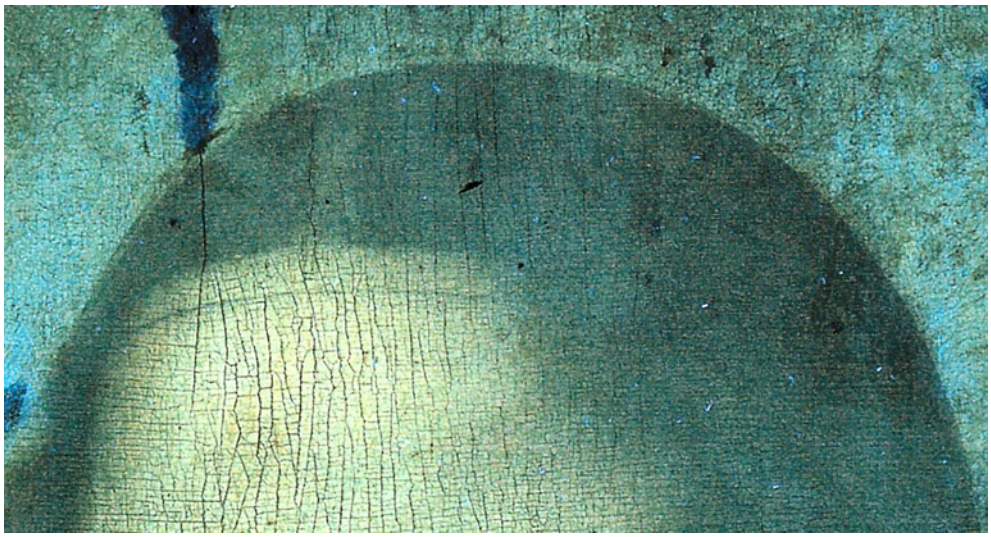


*Figure 23 - Détail de la tête, Image FUV. © Louvre/c2rmf*
*Source : B. Mottin and al.,* The traces of time*, in* Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams (2006), pl. 20, p. 74*

Zones d'oxydation du vernis et légères restaurations visibles. Aucune trace de *spolvero* détectable.

En résumé, bien que précieuse pour l'analyse de surface, la fluorescence UV est inopérante pour la mise en évidence des *spolveri*, tant en raison de sa profondeur de détection nulle que de la nature non fluorescente des matériaux concernés. Voir l'image entière Figure 11a page 12.

### 1.3.6 Hyperspectral

Il convient de signaler que le C2RMF a mis en service dès 2011 une caméra hyperspectrale *push-broom*, couvrant le domaine du Visible et Proche-Infrarouge (VNIR, 400-1000 nm), comme l'atteste sa présentation institutionnelle[5]. Cet instrument capture un hypercube spectral avec une finesse de 3 nm de résolution spectrale. Elle repose sur un système linéaire où la peinture est immobilisée, et où la caméra balaie la surface sur deux axes.

Pourtant, à ce jour, aucune image hyperspectrale publique de ce tableau n'a été diffusée, ni aucune détection de *spolvero* rapportée. Cela suggère que soit l'œuvre n'a pas été numérisée, soit que les résultats n'ont pas été publiés.

Dans ce contexte, la méthode L.A.M. s'inscrit comme une démarche alternative fondée non sur l'étendue spectrale seule, mais sur une combinaison stratégique de longueurs d'onde, couplée à une haute résolution spatiale et dynamique. C'est ce savoir-faire analytique, qui rend visible le *spolvero* et qui fait la force de cette approche.

## 1.4 Mise en œuvre de la méthode L.A.M. premières découvertes des *spolveri*

Les limites rencontrées avec les techniques d'imagerie traditionnelles - réflectographie infrarouge, rayons X, émissiographie, fausse couleur infrarouge - illustrent la persistance d'un paradigme optique fondé sur la transparence : voir à travers les couches en augmentant la pénétration du rayonnement, quitte à sacrifier la résolution ou le contraste local. Ce paradigme, hérité des premières expériences radiographiques appliquées aux œuvres d'art, atteint ici ses limites : les *spolveri*, de faible densité et enfouis sous des couches picturales complexes, échappent à ces approches.
C'est dans ce contexte épistémologique qu'intervient la méthode L.A.M. (*Layer Amplification Method*), conçue non pour « traverser » la matière, mais pour amplifier différentiellement les variations entre couches, en exploitant les propriétés spectrales fines de la lumière réfléchie. Dès ses premières mises en œuvre sur *La Joconde*, cette méthode a permis de révéler des points invisibles jusque-là, disposés de façon régulière dans plusieurs zones du tableau : le front, la main droite, le décolleté. Leur distribution, leur dimension et leur densité sont compatibles avec un tracé préparatoire par *spolvero*, tel que pratiqué dans les ateliers florentins de la Renaissance.

Ces résultats n'auraient pas été possibles sans la convergence de plusieurs conditions instrumentales essentielles :
- une caméra à très haute résolution spatiale, permettant de détecter des éléments < 100 µm ;
- une dynamique radiométrique étendue, pour discriminer des signaux faibles sur fond dense ;
- un éclairage collimaté positionné selon l'angle de Brewster, réduisant les réflexions spéculaires tout en maximisant la lisibilité des micro-contrastes en profondeur.

Les principes, les fondements physiques et la construction de la méthode L.A.M. feront l'objet d'un développement complet au chapitre 3. On se concentre ici sur les premiers résultats concrets, en montrant comment cette approche permet d'accéder à une information restée jusqu'à présent hors d'atteinte, et de poser un nouveau regard - expérimental et historiographique - sur la genèse graphique de *La Joconde*.

[5] https://c2rmf.fr/actualite/hyperspectral

### 1.4.1 Première découverte des *spolveri* de *La Joconde*

Cinq emplacements révèlent être des dessins transférés par la technique du *spolvero*.

1) Sur le front
2) Sur les mains
3) Sur Le contour supérieur de la tête
4) Un projet de coiffe abandonné,
5) Le contour de l'accoudoir
6) La broderie du décolleté
7) Le contour inférieur de la manche droite

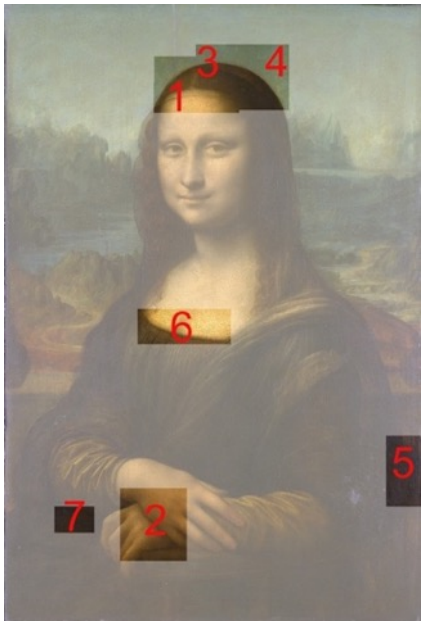



*Figure 24 - Emplacements des* spolveri *retrouvés*

### 1.4.2 *Spolvero* sur le front de *La Joconde* avec les images L.A.M.

La méthode L.A.M. a trouvé le *spolvero* principalement dans les zones claires, qui diffusent la lumière dans les strates inférieures. La détection est plus difficile dans les zones sombres où les points noirs se confondent avec leur environnement.

Sur le front de *La Joconde* (voir Figure 24 -**1**), tel qu'il apparaît aujourd'hui (voir Figure 25a), le bord du voile qui couvre la tête est représenté par une ligne simple qui suit régulièrement la limite des cheveux, quelques millimètres en dessous, de gauche à droite. La réflectographie infrarouge du Louvre à 2000 nm (Lambert, 2006) (voir Figure 25b), montre à peu près la même image que le filtre NIR R900 de la caméra multispectrale (voir Figure 25c). Aucun *spolvero* n'est visible sur ces images, même après application de traitements d'image pour augmenter le contraste.

L'image avec la méthode L.A.M. (voir Figure 25d), a été obtenue en calculant la dérivée numérique des réflectances $R_{600}$, $R_{640}$ et $R_{900}$ (voir page 72).

$$L.A.M. = \left[ -\left( \frac{R_{900} - R_{600}}{2} + R_{600} \right) + p_{cor} R_{640} \right] \qquad \textit{Eq. ( 2 )}$$

Où $R_\lambda$ est la réflectance à la longueur d'onde lambda, et $p_{cor}$ est un coefficient, optimisé pour cette zone, destiné à compenser le terme $\left( \frac{R_{900} - R_{600}}{2} + R_{600} \right)$ en augmentant le poids de la réflectance de référence $R_{640}$. Dans l'image présentée, la valeur adoptée est $p_{cor}$ = 1.064. Cette valeur doit cependant être comprise comme une approximation moyenne : elle ne permet d'annuler rigoureusement le terme qu'au sein d'une zone restreinte de l'image, et ne saurait être valide de façon uniforme sur l'ensemble de la surface bidimensionnelle.

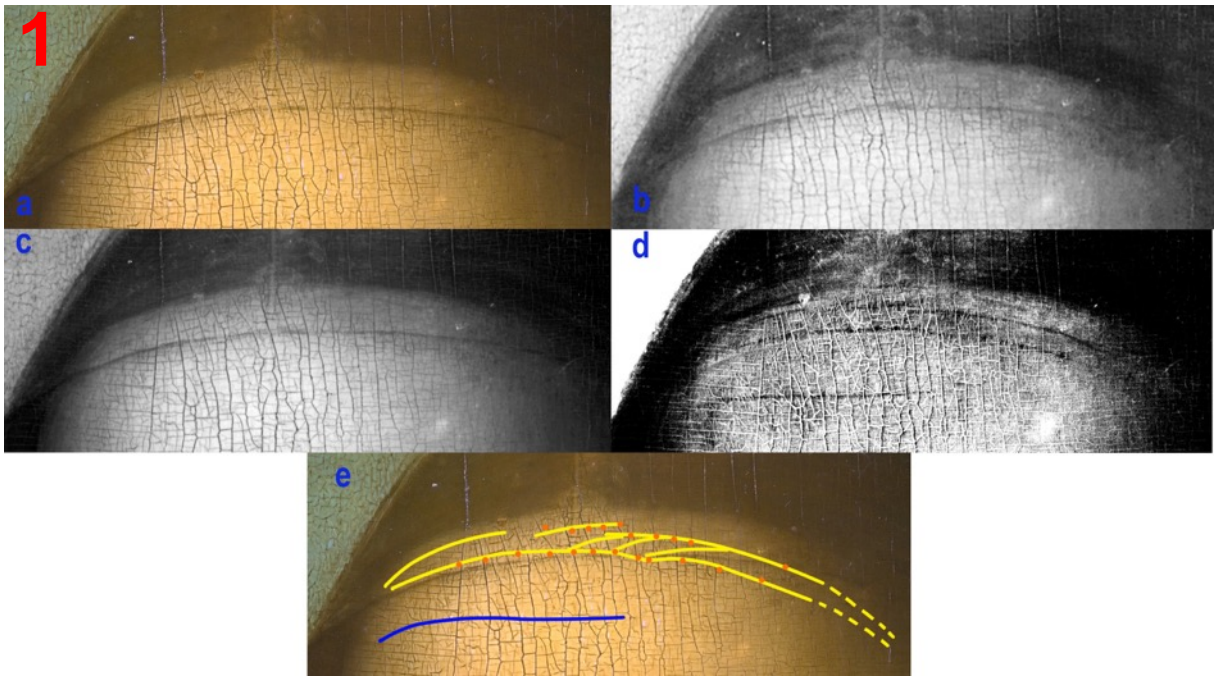



*Figure 25 - Détail du front de* La Joconde *: **a**) Image couleur D65 ; **b**) Réflectographie infrarouge à 2000 nm.* © Louvre, c2rmf *;*
*c) Filtre NIR R900 de la caméra multispectrale.* © P. Cotte *; **d**) Image L.A.M.* © P. Cotte *;*
***e**) - Image couleur D65 + contours du* spolvero. © P. Cotte

Sur l'image L.A.M., un *spolvero* apparaît sur le front (lignes de dessin avec des points noirs), presque au même emplacement, mais les lignes sont plus inclinées vers la droite de *La Joconde*. Il s'agit d'un dessin préparatoire d'un visage tourné vers la droite. Il délimite un voile différent appartenant à un projet antérieur de Léonard. Il dessine deux lignes entre lesquelles Léonard a probablement conçu une broderie, comme on en trouve souvent dans les peintures florentines contemporaines, telles que le *Portrait de Maddalena Strozzi Doni* exécuté par Raphaël en 1506 (huile sur panneau 63 × 45 cm, Palazzo Pitti, Florence Figure 149 page 169). Ceci est la démonstration que cette œuvre a évolué dans sa composition et que Léonard n'est pas resté fixé sur une seule version.

Il est intéressant de noter que l'image L.A.M. montre simultanément les points noirs du transfert (surlignés en orange) et les lignes tracées par l'artiste pour relier ces points (surlignées en jaune) (voir Figure 25e).

Il y a une autre ligne horizontale en dessous, mais elle ne couvre pas toute la largeur du front. Quelques points noirs apparaissent le long de cette ligne, mais le contraste est trop faible pour formuler l'hypothèse qu'il s'agit d'un *spolvero*.

### 1.4.3 Le *spolvero* entre les mains de *La Joconde*

Sur les mains de *La Joconde* (voir Figure 24-2), l'image L.A.M. de la Figure 26d montre une série de points noirs reliés par une ligne : il s'agit du *spolvero* d'un dessin préparatoire probablement original. L'espacement des points noirs est du même ordre de grandeur (voir Figure 26e) que pour le portrait d'Isabelle d'Este (voir Figure 8 page 10) et histogramme de comparaison (voir Figure 28 page 27).

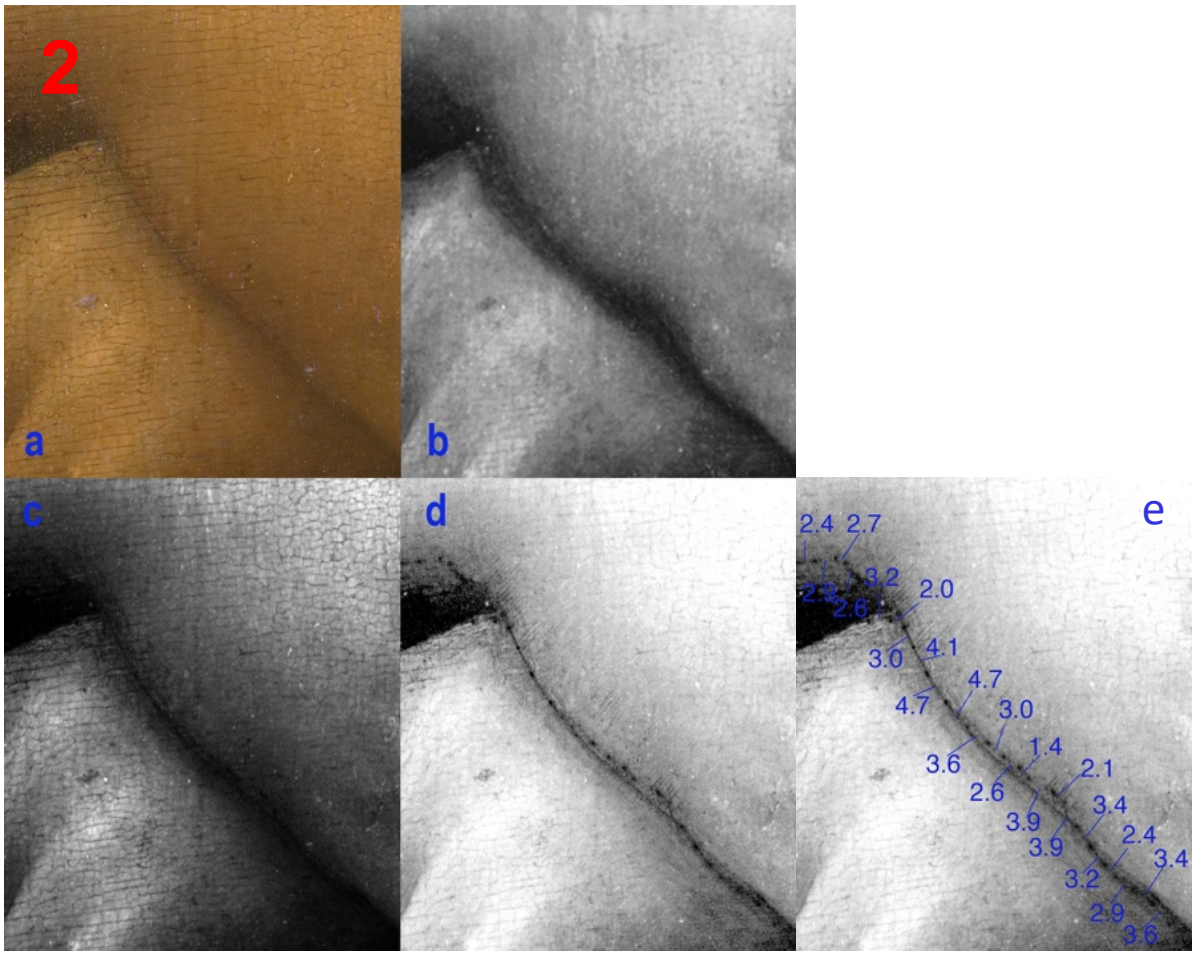



*Figure 26 - Détail des mains de* La Joconde *: **a)** - Image couleur D65 ; **b)** - Réflectographie infrarouge à 2000 nm. © Louvre ; **c)** - Réflectance visible $R_{720}$. © P. Cotte ; **d)** - Image L.A.M. © P. Cotte ; **e)** - Mesures de distances entre les points. © P. Cotte*

Les images L.A.M. permettant de visualiser les points noirs du *spolvero* utilisent des filtres uniquement dans la gamme visible à 720 nm et 480 nm. Dans ce cas spécifique, l'opération n'est pas effectuée directement sur la réflectance, mais sur les rapports $K_\lambda/S_\lambda$ entre les coefficients d'absorption $K$ et de rétrodiffusion $S$ obtenus à partir de la réflectance par la fonction de Kubelka-Munk (Kubelka et Munk, 1931; Kubelka, 1948, 1954). Cette opération met en évidence les différences d'absorption et avec $p_{cor}$ est plus sensible que les différences de réflectance.

$$L.A.M. = \left[\left(\frac{(1-R_{720})^2}{2R_{720}}\right) - p_{cor}\left(\frac{(1-R_{480})^2}{2R_{480}}\right)\right] \qquad \textit{Eq. ( 3 )}$$

où $R_\lambda$ est la réflectance à la longueur d'onde lambda, et $p_{cor}$ est un coefficient permettant d'optimiser le contraste ($p_{cor}$ = 1.082) dans cette zone de l'image.

D'autres images L.A.M., non présentées ici, montrent que le *spolvero* entoure complètement la main droite, mais les contrastes des points noirs sont faibles et plus difficiles à discerner.

La réflectographie infrarouge à 2000 nm (voir Figure 26b) (Mottin, 2006) ne permet pas de distinguer le *spolvero*, tout comme la réflectance visible à $R_{720}$ (voir Figure 26c).

### 1.4.4 Autres *spolveri* retrouvés

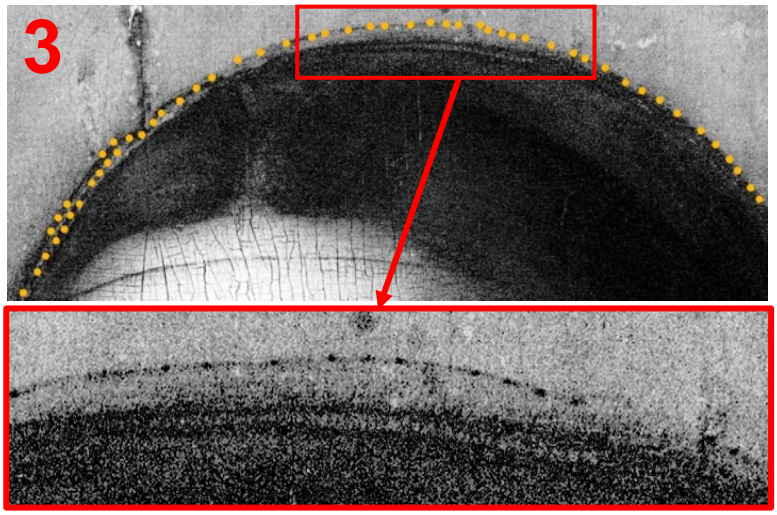



*Figure 27* - Spolvero *du contour supérieur de la tête (3)* © P. Cotte

Dans la chronologie de l'exécution d'une peinture, l'artiste commence par utiliser le *spolvero*, et toute déviation de la peinture par rapport à celui-ci peut suggérer une reprise, un ajustement mineur. Ainsi, ce contour de tête, légèrement plus bas de 6 millimètres par rapport au tracé initial, pourrait être interprété comme une retouche contemporaine au *spolvero*. Néanmoins, une analyse plus approfondie (cf. § 5.7.3, page 161), révèle que cette zone a été grattée alors que la peinture était déjà sèche et durcie, suggérant plutôt un repentir profond lié à une refonte de la composition antérieure.

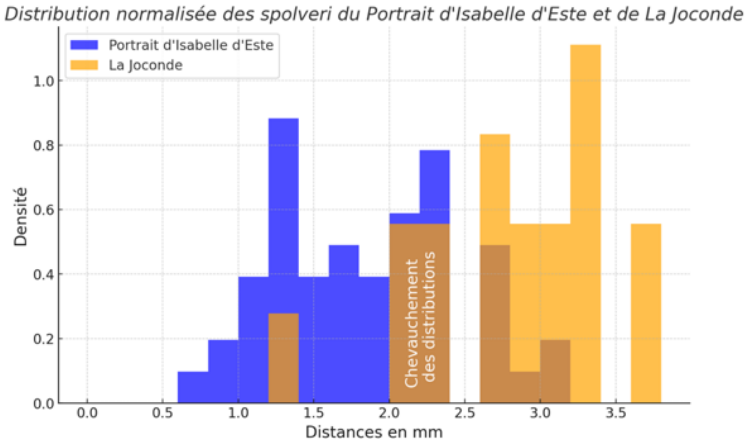



*Figure 28 - Ce graphique de la distribution normalisée des distances mesurées entre les points de perçage des* spolveri *utilisés pour transférer les dessins du* Portrait d'Isabelle d'Este *(en bleu) et de* La Joconde *(en orange).*

La Figure 28 présente la distribution normalisée des distances entre les points de perçage des *spolveri* relevés sur deux œuvres : le *Portrait d'Isabelle d'Este* (barres bleues) et *La Joconde* (barres oranges). Chaque courbe représente une estimation de densité : elle exprime la fréquence relative des distances mesurées, ajustée de façon que l'aire sous chaque courbe soit égale à 1. Ce type de normalisation permet une comparaison directe des formes de distribution, indépendamment du nombre total de mesures réalisées pour chaque dessin.

On observe que les deux courbes présentent des profils proches, centrés autour de valeurs similaires, avec des pics de densité dans des plages voisines. Les zones de recouvrement, marquées ici en marron, indiquent les intervalles de distances communes aux deux distributions, c'est-à-dire les espacements

de points fréquemment observés sur les deux œuvres. Ce chevauchement statistique renforce l'hypothèse d'une même méthode de transfert, voire d'un outillage ou d'un geste technique similaire dans la perforation des cartons, confirmant une filiation stylistique et technique à Léonard.

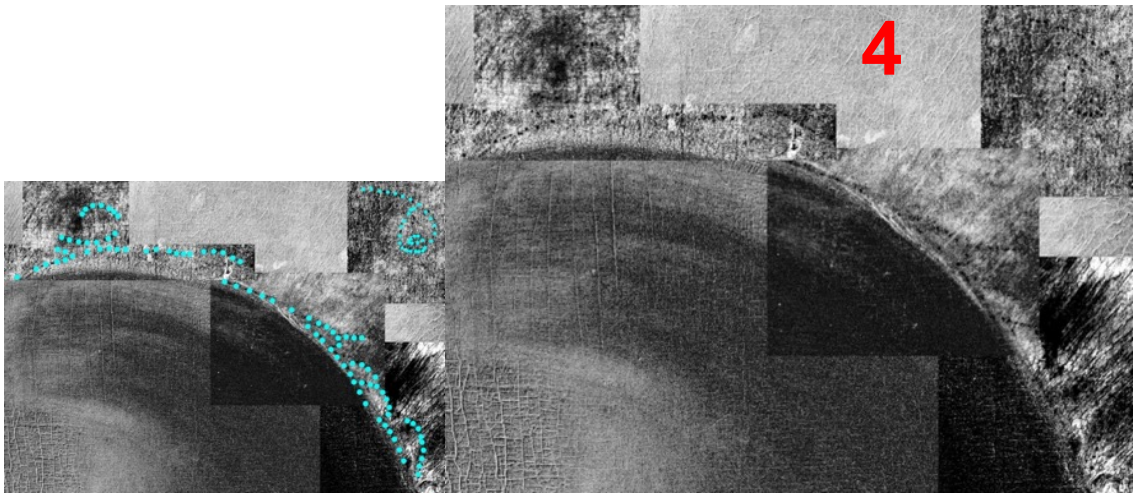



*Figure 29* - Spolvero *retrouvé avec les images L.A.M. dans le ciel de* La Joconde *pour un projet de coiffe (4)* © P. Cotte

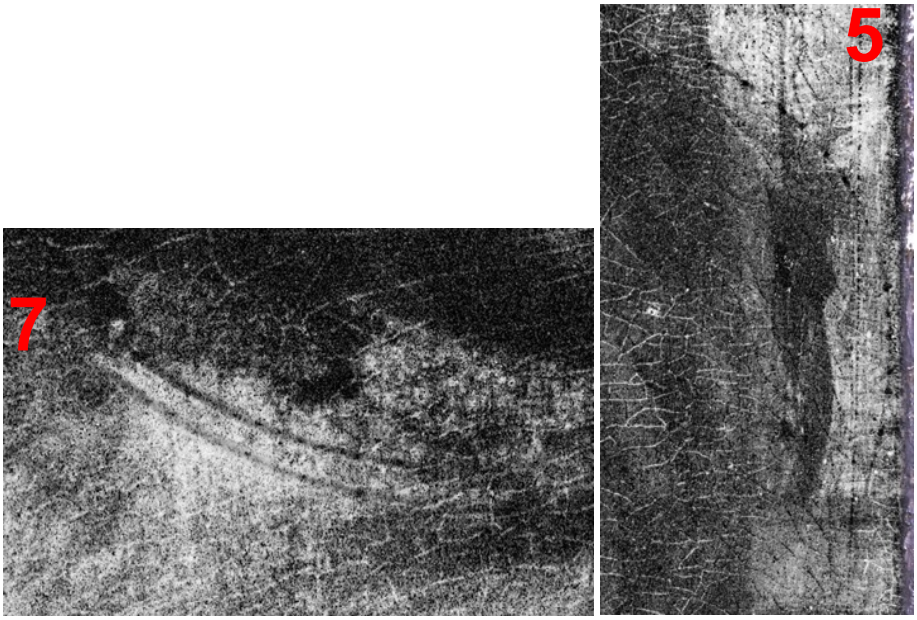



*Figure 30 - Les* spolveri *retrouvé avec les images L.A.M. :*
*sous la manche droite (←) (7) - sur le contour de l'accoudoir (→) (5)* © P. Cotte

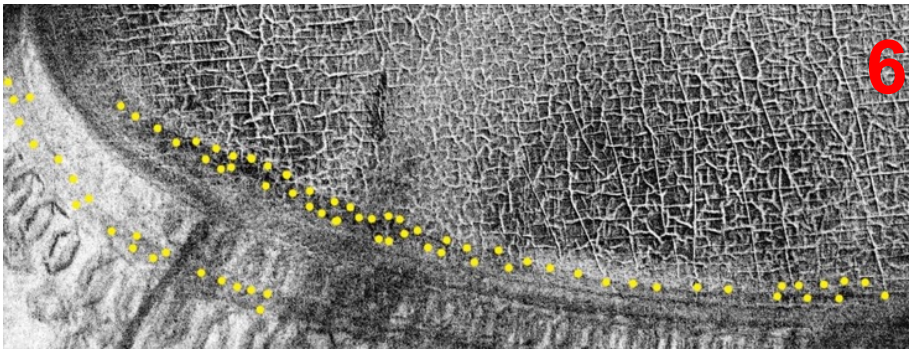



*Figure 31 - Les* spolveri *retrouvé avec les images L.A.M. sur la broderie au bord du décolleté (6)* © P. Cotte

**Analyse des résultats**

La différence des résultats obtenus avec la méthode L.A.M. et la réflectographie IR s'explique en partie par deux principales caractéristiques techniques de la caméra multispectrale : la CTF (*Contrast Transfert Function*) (voir § 6.1.3 page-sup. - 11 -) et le rapport signal/bruit (SNR) (voir § 6.1.1 page-sup. - 4 -), mais aussi grâce à l'utilisation de filtres à bandes passantes étroites et à la haute définition de la caméra de 240 mégapixels. La qualité de l'image permet une forte amplification des signaux faibles et une haute discrimination de l'information.

D'autres caractéristiques accentuent également cette différence : la CTF pour les longueurs d'onde IR supérieures à 1000 nm est plus faible que la CTF dans le domaine visible, à mesure que la longueur d'onde augmente, la limite de diffraction induit une diminution de la résolution spatiale. (voir Tableau 1 page 14). Les longueurs d'onde à 1700 nm ou 2500 nm pénètrent plus profondément dans la couche picturale (Daffara et al., 2010) (Delaney, Trumpy, et al., 2017). Cependant, la diffusion plus forte dans la couche picturale peut rendre impossible la détection de détails importants ; les IR peuvent traverser la couche sans voir les éléments situés juste sous la surface de la peinture.

## 1.5 Interprétation historique et stylistique

La mise en évidence de *spolveri* sur plusieurs zones clés de *La Joconde* permet d'avancer avec un haut degré de vraisemblance l'hypothèse d'un carton préparatoire, utilisé par Léonard selon une méthode de transfert méthodique, fidèle à la pratique de la *bottega* florentine de Verrocchio. Cette hypothèse s'inscrit dans une tradition bien établie de la Renaissance italienne, où l'usage du carton permettait non seulement de fixer une composition, mais aussi de la reproduire ou l'adapter à d'autres supports. Des artistes tels que Ghirlandaio, Botticelli ou Raphaël ont eu abondamment recours à cette technique, tant dans le domaine du retable que de la fresque.

On retrouve chez Léonard cette même rigueur préparatoire dans plusieurs dessins perforés conservés, notamment dans le *Portrait d'Isabelle d'Este*, dont les espacements entre les points de piquetage sont proches de ceux observés sur *La Joconde* (voir Figure 8 page 10). Mais l'intérêt du présent travail réside aussi dans la révélation d'une évolution du projet pictural : certains *spolveri* identifiés ne coïncident pas avec les contours définitifs du tableau. Ainsi, un *spolvero* situé sur le front révèle une orientation initiale différente du visage, et celui repéré dans le ciel, à droite de la tête, atteste de la présence ancienne d'une coiffe dont la forme a été modifiée, voire abandonnée. De même, des divergences ont été relevées dans le tracé du bord du vêtement et de la broderie du décolleté.

Ces écarts témoignent d'un processus créatif fondé sur une interaction constante entre le projet initial et les ajustements progressifs. Loin d'un travail figé dès l'origine, *La Joconde* apparaît comme une œuvre en transformation continue, où le dessin transféré constitue un point de départ, non un carcan. Cette dynamique de reprise et de reformulation est au cœur de la méthode de Léonard, qui conçoit l'acte de peindre comme une construction progressive par strates - matérielles, perceptuelles et intellectuelles.

En cela, *La Joconde* s'inscrit pleinement dans la démarche expérimentale de Léonard : un tableau pensé comme un processus, où la planification graphique précède et accompagne l'invention picturale. La découverte des *spolveri* confirme que cette œuvre, souvent perçue comme intuitive ou insaisissable, procède au contraire d'une conception rigoureusement orchestrée, selon des principes observables dans d'autres œuvres de l'artiste et dans l'ensemble de sa production graphique.

## Conclusion

La mise en évidence de *spolveri* sur *La Joconde*, invisible jusqu'ici malgré de nombreuses campagnes d'imagerie, constitue un jalon méthodologique majeur. Elle ne se limite pas à une découverte ponctuelle : elle témoigne de l'efficacité d'une approche instrumentale et analytique fondée sur une méthode originale - la méthode L.A.M. - conçue pour franchir les seuils d'invisibilité imposés par la stratigraphie picturale.

En révélant des micro-traces effacées par le temps ou masquées par les matériaux, la méthode L.A.M. renouvelle profondément les outils disponibles pour l'étude des œuvres anciennes. Elle permet non seulement de valider des hypothèses techniques (comme l'usage d'un carton préparatoire), mais aussi de réinterroger des œuvres majeures sous un angle inédit, où les couches picturales deviennent des strates d'intention, de modification, de renoncement. En ce sens, il s'agit d'une avancée qui touche à la fois la technique, l'histoire de l'art et l'épistémologie de la trace.

Ce chapitre montre qu'à condition d'être rigoureusement conçue et interprétée, une image scientifique peut devenir un instrument herméneutique, capable de faire émerger des dimensions historiques, stylistiques et conceptuelles jusque-là inaccessibles. Ce déplacement du regard ne peut se faire sans outils adaptés : il suppose une chaîne instrumentale spécifiquement pensée pour les enjeux du patrimoine.

Ce premier chapitre a mis en évidence un déplacement épistémologique : l'examen d'une œuvre telle que *La Joconde* ne peut se limiter aux méthodes d'observation traditionnelles. La révélation d'un *spolvero* jusque-là invisible impose de redéfinir les conditions de visibilité des strates picturales et de concevoir de nouveaux instruments de lecture. Or cette avancée n'aurait pas été possible sans le développement d'une caméra multispectrale inédite et de son dispositif d'éclairage collimaté (chapitre 2), associés à la méthode L.A.M. (chapitre 3). Ces deux volets techniques et méthodologiques constituent les conditions nécessaires de l'accès aux informations révélées dans ce chapitre.

# CHAPITRE 2

## Développement d'une caméra multispectrale et d'un éclairage collimaté, numérisation de *La Joconde*

« L'amélioration de l'optique instrumentale ne peut résulter que d'une compréhension exacte des lois physiques de la formation des images. »

Ernst Abbe, *Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung, Archiv für mikroskopische Anatomie,* vol. 9, 1873, p. 413-468

# 2 CHAPITRE 2 - Développement d'une caméra multispectrale et d'un éclairage collimaté, numérisation de *La Joconde*

## Introduction

Ce chapitre présente une synthèse du dispositif instrumental développé et utilisé dans le cadre de cette thèse, avec une attention particulière portée à son application à l'étude de *La Joconde*. Il s'agit de décrire les principes de conception de la caméra multispectrale à 13 filtres et 240 millions de pixels, les choix technologiques qui ont guidé son élaboration, ainsi que les spécificités de son intégration dans un protocole d'imagerie appliqué au patrimoine culturel.

Ce chapitre prend place immédiatement après l'analyse du cas du *spolvero* de *La Joconde*, qui a mis en évidence les limites des techniques d'imagerie traditionnelles. La découverte de ce repère graphique, pourtant historiquement attesté, mais resté visuellement inaccessible jusqu'alors, constitue un point de bascule épistémologique : elle démontre que des informations majeures peuvent rester invisibles aux outils classiques, mais devenir lisibles à travers des dispositifs optiques et algorithmiques innovants.

Dans cette perspective, la caméra multispectrale développée constitue le socle instrumental des résultats obtenus, et sa description précède logiquement celle de la méthode L.A.M., abordée dans le chapitre suivant. Afin de répondre aux attentes de haute définition, de fidélité spectrale et de stabilité géométrique qu'exige l'imagerie scientifique des œuvres d'art, l'ensemble du système - capteurs, filtres, optique, éclairage et procédures de reconstruction - a été conçu selon un cahier des charges rigoureux, fondé sur les limites identifiées dans l'état de l'art antérieur à 2004.

Ce chapitre adopte une approche volontairement synthétique. Les aspects plus détaillés de la conception, des tests et des performances du dispositif sont présentés dans la section « Suppléments », à laquelle le lecteur est invité à se reporter pour une compréhension approfondie de chaque composante technique. Cette organisation vise à clarifier la structure de l'exposé tout en offrant plusieurs niveaux de lecture, en fonction des attentes et du profil des membres du jury.

Enfin, la dernière section de ce chapitre situe ce travail dans le contexte de l'évolution des recherches postérieures à 2004, en mettant en lumière les innovations qu'il a suscitées ou anticipées dans le domaine de l'imagerie multispectrale appliquée aux biens culturels.

Il se termine par la numérisation de *La Joconde* et les détails de la mise en œuvre de la caméra multispectral et de son éclairage.

## 2.1 Positionnement par rapport à l'état de l'art avant 2004

La caméra multispectrale à 13 filtres utilisée dans cette thèse s'inscrit dans la continuité d'un programme de recherche initié en 1998, concrétisé par le dépôt d'un brevet (Cotte & Dupouy, 1998) et soutenu par une aide à la recherche et à l'innovation de 2 millions de francs accordée par l'ANVAR contrat A 98 05 134 Q AE d'octobre 1998. Ce programme, structuré en deux phases - développement d'une caméra en version noir et blanc, puis élaboration d'une version couleur intégrant un système d'éclairage - a été mené au sein de la société Lumière Technology, sous la direction exclusive de son président et responsable scientifique auteur de la présente thèse. L'ensemble des décisions techniques, conceptuelles et méthodologiques ont été prises sous son autorité. Une équipe composée de cinq ingénieurs et techniciens a été mobilisée pour la mise en œuvre opérationnelle : un ingénieur en micromécanique, un ingénieur en électronique et trois ingénieurs en informatique, voir encart spécial page 41 .

La version initiale de la caméra, monochrome, repose sur un capteur CCD linéaire de 12 000 pixels (modèle TH-7834C, fourni par la société Thomson-CSF), offrant une résolution de 240 millions de pixels. Conçue pour la numérisation d'archives de grand format, elle a une précision géométrique de numérisation de l'ordre de 3 micromètres (EMQ). À l'issue d'un appel d'offres, plusieurs exemplaires furent livrés au Service du Cadastre de la Direction Générale des Impôts pour la numérisation des 600.000 plans cadastraux français. Trois unités supplémentaires furent également fournies au département de géographie de l'Université du Michigan pour la numérisation des cartes cadastrales de l'U.S. Geological Survey.

Dès l'origine, l'architecture optique, mécanique et spectrale du système avait été conçue pour permettre une évolution vers une acquisition couleur, puis multispectrale. Le système présenté ici est l'aboutissement de cette démarche. Le système multispectral avait été finalisé et validé techniquement dès 2000, avant même son intégration ultérieure au projet européen CRISATEL (2001-2004). Le projet CRISATEL servait à l'évaluation de la caméra dans un cadre muséographique, au développement de logiciels de tests. Dans ce cadre Lumière Technology a étudié des adaptations hardware possibles de l'optique et de l'éclairage pour un usage muséal, mais le système initial s'est révélé pleinement adapté et n'a nécessité aucune modification. Tous les logiciels de la caméra multispectrale utilisés aujourd'hui ont été écrit par Lumière Technology *ex nihilo*.

**Épistémologie de la couleur : de la perception à la mesure**

Pour comprendre l'origine de la caméra, il est essentiel de revisiter l'approche scientifique de la couleur à travers l'histoire. Notre compréhension moderne de la couleur prend racine avec Sir Isaac Newton au XVII$^{e}$ siècle. Newton démontra que la lumière blanche est une combinaison de plusieurs couleurs qui peuvent être séparées à l'aide d'un prisme. Il systématisa ce spectre visible en identifiant sept couleurs principales : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet, une classification qu'il établit de manière arbitraire en référence aux sept notes d'une gamme musicale. Cette avancée fondamentale établit le principe selon lequel la couleur résulte de la composition spectrale de la lumière réfléchie ou émise par les objets, marquant ainsi un tournant majeur dans notre compréhension scientifique de la perception des couleurs. Au XIX$^{e}$ siècle, Johann Wolfgang von Goethe proposa une théorie axée sur l'expérience subjective de la couleur. À l'opposé de Newton, Goethe percevait la couleur comme un phénomène psychologique, influencé par la perception humaine. Bien que sa théorie n'ait pas supplanté celle de Newton, elle a influencé les études ultérieures sur la perception des couleurs.

Parallèlement, Johann Heinrich Lambert et Tobias Mayer apportèrent des contributions notables, Mayer ayant notamment proposé un diagramme de trois couleurs primaires (voir Figure 32). Eugène Chevreul

contribua également à la science des couleurs avec ses travaux sur les contrastes simultanés, mettant en évidence comment la juxtaposition de couleurs influe sur leur perception. Des peintres tels qu'Eugène Delacroix et Vincent van Gogh[6] ont suivi ces principes dans leurs œuvres. Enfin, Albert H. Munsell créa un système de classification des couleurs, qui est toujours largement adopté dans divers domaines.

*Figure 32 - Triangle de Mayer*

Au début du XIX$^{e}$ siècle, le physicien britannique Thomas Young proposa que la vision humaine repose sur trois types de récepteurs sensibles à la lumière, chacun correspondant à une des trois couleurs primaires : rouge, vert, et bleu. Développée plus tard par James Clerk Maxwell et Hermann von Helmholtz, cette théorie de la trichromie démontrait que la perception de toutes les couleurs pouvait être reproduite par la combinaison de ces trois primaires.

À la fin du XIX$^{e}$ siècle, Gabriel Lippmann développa un procédé photographique, fondé sur l'interférence, pour reproduire fidèlement les couleurs. Pour cette invention, il reçut le prix Nobel de physique en 1908. Ce procédé capturait directement les couleurs sur une plaque photographique, sans pigments, grâce aux interférences lumineuses générées par un miroir placé derrière la plaque. Ce processus, bien que complexe et révolutionnaire pour son époque, s'avérait délicat et peu pratique pour un usage courant. Cependant, cette innovation ouvrit de nouvelles perspectives en démontrant qu'il existait d'autres moyens de capturer et de reproduire les couleurs que le procédé trichrome.

*Figure 33 - Photographie couleur de Gabriel Lippman, sans pigment, utilisant les interférences lumineuses. Jardin du château de Versailles.*

Cette innovation a révélé que la capture de la couleur pouvait aller au-delà, englobant l'ensemble du spectre lumineux. En effet, en comprenant que la couleur résulte de la composition spectrale de la lumière, il est devenu évident que la spectrophotométrie, qui mesure précisément le spectre de la lumière, offrait

[6] Lettre n°449 Br. 1990: 452 | CL: 370 Vincent van Gogh à Theo van Gogh, Nuenen, Vendredi, 6 juin 1884. Dans cette lettre Vincent van Gogh reprend un passage du livre de Charles Blanc qui explique les travaux de Chevreul.

une voie prometteuse pour des applications d'haute-fidélité chromatique et pour surmonter les limitations des systèmes basés sur le modèle RVB.

En définitive, bien que la photographie par interférence de Lippmann n'ait pas été viable pour un usage conventionnel, elle a pavé la voie à des méthodes de capture de couleur plus sophistiquées, telles que les techniques multispectrales capturant l'intégralité du spectre lumineux développée dans cette thèse.

Après Gabriel Lippmann, au début du XX$^{e}$ siècle, la photographie couleur a connu des avancées importantes avec la trichromie additive et la synthèse soustractive. L'introduction des autochromes par les frères Lumière en 1907, utilisant des grains de fécule de pomme de terre teintés en rouge, vert et bleu, a marqué une étape clé. Ce procédé repose sur la juxtaposition de grains colorés, assurant une synthèse additive des couleurs, et permettait de capturer des images aux couleurs plus naturelles et réalistes.

Dans les années qui suivirent, la synthèse soustractive, développée notamment par Kodak avec son système Kodachrome dans les années 1930, introduisit une nouvelle méthode pour créer des images couleur. Ce processus impliquait la superposition de couches de colorants cyan, magenta et jaune sur un film photographique, inversant ainsi le processus de la trichromie additive. Le Kodachrome et d'autres films couleur basés sur ce principe devinrent populaires pour leur capacité à produire des images riches en couleur avec une fidélité accrue.

Ces avancées ont ouvert la voie à une diversité d'approches techniques pour capturer et reproduire la couleur en photographie, s'appuyant sur les principes établis par Newton et développés à travers les expériences de Lippmann et les innovations des premiers films couleur.

**Les limites de la couleur dans la photographie numérique des années 90**

Au cours des années 1990, les systèmes photographiques numériques basés sur le modèle RVB ont connu un développement rapide. Cette période a été caractérisée par des avancées significatives en définition, qualité d'image et démocratisation des appareils. Plusieurs entreprises lancèrent alors sur le marché des appareils photo numériques, tant compacts que reflex, équipés de capteurs CCD ou CMOS avec filtres couleur de type Bayer, permettant la capture d'images haute définition et leur stockage sur des cartes mémoire numériques.

Cependant, les systèmes (appareil photo, caméra, scanner) basés sur le modèle RVB ont montré des limitations notables. Parmi ces limitations, la gamme restreinte de couleurs était un enjeu majeur. Les photographes professionnels, par exemple, rencontrent régulièrement des difficultés à reproduire fidèlement les couleurs de certains tissus, notamment les bleus-violacés ou les fluorescents. L'émergence des sites web marchands réclament une meilleure fidélité.

De plus, le modèle RVB s'avérait souvent inadéquat pour des reconstructions précises de spectres de réflectance, sauf dans quelques domaines spécifiques de diagnostics médicaux (Shiobara et al., 1995) (Imai et al., 1996) (Imai, 1996). Il était également incapable de résoudre les problèmes de métamérie, où différentes couleurs sont perçues comme identiques sous certaines conditions lumineuses.

**Revue de Littérature : Les fondements de la recherche en imagerie multispectrale avant 1999**

Cette revue de littérature s'achève en 1999, année marquant le début de la conception de la caméra multispectrale étudiée dans cette thèse. À cette époque, les avancées dans l'imagerie multispectrale ont révélé la nécessité d'une approche alternative. L'ouvrage *Physique de la Couleur* (Sève, 1996) a joué un rôle clé en inspirant le développement de cette technologie, notamment en ouvrant la voie à une approche via la spectrophotométrie, au-delà de la simple fidélité colorimétrique.

Initialement, l'imagerie multispectrale se concentrait sur des applications spécialisées comme la télédétection satellitaire (Gruninger et Sundberg, 1995) et l'imagerie aérienne (Palmer, Borstad et Boxall, 2011). Des projets tels que le lancement du Landsat 4 en 1982 et du satellite européen SPOT en 1986 ont illustré l'importance de cette technologie pour la cartographie, la surveillance environnementale (Adams et al., 1995) et l'analyse agricole (Schulthess et al., 2013). Ces images ont permis aux scientifiques d'étudier les caractéristiques de la surface terrestre en enregistrant différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique.

Parmi une variété d'applications, la numérisation d'œuvres d'art s'est rapidement imposée comme prioritaire. L'analyse d'articles scientifiques a mis en lumière des défis spécifiques, notamment dans l'utilisation de l'infrarouge et les problèmes d'éclairage des œuvres d'art, critiques pour les conservateurs de musées.

Le nombre de filtres utilisés pour décomposer le spectre de la lumière, un facteur déterminant pour la précision de la reproduction des couleurs, a varié significativement au fil des années. Les travaux de recherche dans des domaines divers (médecine, cosmétique, scanner, art, télévision etc.) illustrent cette évolution.

**Configurations multispectrales à 3 filtres**

Il convient de souligner que, dans la littérature, le terme multispectral s'applique également à des dispositifs utilisant un nombre réduit de filtres, y compris trois seulement.

• (Shiobara et al., 1995) ont exploré l'application des spectres en endoscopie, mettant en évidence que l'utilisation de **trois filtres** en conjonction avec un illuminant D65 ou F2 atteint une précision adéquate. Ils ont amélioré la colorimétrie en développant un spectrophotomètre endoscopique dédié à la muqueuse gastrique. Leur étude a montré que trois composantes principales suffisent à assurer une reproduction colorimétrique précise sous divers illuminants, ce qui met en évidence l'efficacité des configurations de filtrage minimalistes pour garantir la précision des mesures spectrales.

• (Imai, 1996), (Imai, Tsumura et Haneishi, 1996) se sont concentrés sur les spectres de la peau, démontrant que **trois filtres** suffisent pour obtenir une précision acceptable dans leurs mesures. Cette recherche souligne l'efficacité d'une approche minimaliste en filtration pour la caractérisation spectrale de la peau, ouvrant des voies prometteuses pour les applications médicales et cosmétiques.

**Quatre et cinq filtres**

• (Chen et Trussell, 1995) ont étudié la mesure des couleurs à l'aide d'un colorimètre et leur représentation sur un écran CRT (Cathode Ray Tube), en mettant l'accent principalement sur la colorimétrie plutôt que sur la spectrométrie. Leur recherche a porté sur le choix des illuminants et l'utilisation d'un dispositif équipé de **quatre filtres** gaussiens, soulignant des aspects cruciaux de la colorimétrie et les impacts des différents types d'éclairage sur la précision de la reproduction des couleurs.

• (Kollarits et Gibbon, 1992) ont établi des principes théoriques pour l'imagerie multispectrale, applicables non seulement à la télévision haute définition mais aussi à d'autres domaines. Leur méthode, qui couvre le spectre visible de 400 à 700 nm, utilise **cinq filtres** et recommande un éclairage conforme aux normes de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), avec deux projecteurs à 45 degrés.

• (Yokoyama et al., 1997) ont démontré que l'utilisation de **cinq filtres** gaussiens dans le domaine visible garantit une précision suffisante pour les mesures spectrales. Leur système utilise une définition de 2 000 x 2 000 pixels et une dynamique de 12 bits.

• (Hardeberg et al., 1998), (Hardeberg et al., 1999) ont utilisé une caméra économique équipée de trois à **cinq filtres** pour reconstruire les courbes de réflectance, examinant également les performances sous différents illuminants. Cette approche a permis d'évaluer l'efficacité et la flexibilité du système dans des conditions d'éclairage variées, soulignant l'importance du choix des illuminants pour une reconstruction précise des spectres.

**Six à sept filtres**

• (Tominaga, 1996), (Tominaga, 1997) a démontré qu'avec **six filtres** gaussiens dans le domaine visible, une précision adéquate peut être atteinte. Il a aussi recommandé un système à dynamique supérieure à 12 bits pour améliorer la qualité des images, ce qui confirme les choix techniques pour la caméra développée dans cette thèse.

• Dans le cadre du projet VASARI à la National Gallery de Londres, les travaux menés par (Saunders et Cupitt, 1993), ainsi que par (Martinez, Cupitt et Saunders, 1993), utilisant **sept filtres** dans le spectre visible pour la numérisation de peintures, sont reconnus pour leur exhaustivité. David Saunders a aussi contribué au projet CRISATEL, validant l'utilisation de la caméra multispectrale développée dans cette thèse. La technique innovante de gestion de l'éclairage permet le déplacement de la caméra et de l'éclairage sur les axes X et Y, créant une matrice de 20 000 x 20 000 pixels à partir d'une caméra de 3 000 x 2 000 pixels. Cette approche a établi une norme pour la numérisation des œuvres d'art jusqu'à un mètre de large, optimisant ainsi la définition pour la caméra multispectrale expliquée dans cette thèse.

• (Abrardo et al., 1996) ont approfondi les recherches initiées par la *National Gallery*, se concentrant sur le retraitement des spectres et les corrections en colorimétrie. Leur travail a affiné les techniques existantes et amélioré la précision des corrections colorimétriques, apportant ainsi une contribution majeure à l'optimisation des processus de restauration et d'analyse des œuvres d'art.

• (Burns et Berns, 1998) ont utilisé **sept filtres** gaussiens dans le domaine visible, soulignant la sensibilité de cette configuration au bruit de mesure. Leur étude a mis en évidence l'impact du choix des filtres sur la précision des données et a influencé les décisions techniques pour la conception de la caméra développée dans cette thèse, en particulier pour la gestion du bruit et l'optimisation des performances de mesure.

**Dix à douze filtres**

• (Maître et al., 1996) ont développé une méthode de calcul pour estimer le nombre de filtres nécessaires à la numérisation et la reconstruction des spectres de pigments de peintures. Cette avancée est capitale pour notre décision d'utiliser **dix filtres** équidistants, répartis uniformément sur le spectre visible, assurant une couverture spectrale adéquate et améliorant la fidélité de la reproduction des couleurs dans la numérisation artistique.

• (Praefcke et Keusen, 1995), de même que (Keusen, 1995), ont utilisé **douze filtres** interférentiels couvrant le spectre visible de 400 à 700 nm pour étudier l'impact de différents illuminants sur les résultats de mesure. Leurs travaux révèlent la complexité et la précision nécessaires pour analyser efficacement la lumière sous diverses conditions d'éclairage.

**Seize filtres et plus.**

• (Koenig et Praefcke, 1998) ont développé une caméra de 2 000 x 2 000 pixels et 12 bits, utilisant **seize filtres** interférentiels de 400 à 700 nm. Ils ont démontré que ces filtres interférentiels offrent une plus grande précision et performance que les filtres gaussiens.

• (Vora et al., 1997) ont utilisé une caméra de 2 000 x 2 000 pixels, 12 bits, équipée de **trente et un filtres** de 400 à 700 nm avec des intervalles de 10 nm. Leurs recherches indiquent que l'utilisation de 31 filtres n'apporte pas de précision supplémentaire par rapport à l'utilisation de 10 filtres, du moins pour l'analyse d'œuvres d'art.

• (Baronti et al., 1998) ont exploré les spectres du visible aux infrarouges (SWIR), s'étendant de 400 nm à 2000 nm, avec une caméra Vidicon de basse définition. Cette recherche, menée par un laboratoire spécialisé dans l'analyse des œuvres d'art, renforce la décision d'intégrer des filtres infrarouges à notre système pour améliorer la précision et la profondeur de l'analyse des peintures.

**Avancées et implications techniques de l'imagerie multispectrale en analyse d'art**

Les études de la *National Gallery* de Londres (Saunders et Cupitt, 1993) démontrent qu'une définition de 12 000 x 20 000 pixels est optimale pour analyser les craquelures sur des tableaux d'un mètre de large. Plusieurs publications qui viennent d'être citées démontrent qu'une dynamique d'image supérieure à 12 bits et l'utilisation d'au moins dix filtres optiques répartis régulièrement sur le spectre visible sont idéaux pour l'analyse des pigments et des peintures.

Les filtres interférentiels, régulièrement répartis sur le spectre, surpassent les filtres teintés à réponse gaussienne en termes de performances optiques : transmittance élevée, bande passante régulière et plate, pentes spectrales abruptes et forte réjection hors bande, limitant efficacement les recouvrements entre canaux. Grâce à ces propriétés, les caméras multispectrales peuvent atteindre des écarts de couleur moyens inférieurs à $\Delta E^*_{ab}$ de 2.2 soit en deçà du seuil de perception d'un observateur humain standard, voir « Suppléments » (§ 6.6.3 page-sup - 56 -).

Tous les systèmes décrits dans ces articles opèrent en basse définition, ce qui élimine la nécessité de traiter des problématiques telles que la mise au point ajustée par filtres, et le redimensionnement des images. Cette remarque s'applique également à la caméra Vasari, qui produit des images en basse définition qui sont ensuite assemblées pour former une mosaïque haute définition.

## 2.2 Cahier des charges de la caméra multispectrale

L'objectif ambitieux de réaliser une capture multispectrale de 240 mégapixels représentait donc un défi sans précédent, nécessitant des innovations majeures car les études antérieures n'avaient pas abordé ni proposé de solutions à cette échelle.

Parmi les pionniers de ce domaine, un premier brevet a été déposé (Cotte, 1996) concernant un appareil photo à fibre optique et photomultiplicateur, anticipant ainsi des avancées futures. L'utilisation d'une fibre optique a été reprise en 2006 par un autre groupe de chercheurs (Bonifazzi et al., 2006). Un deuxième brevet (Cotte et Dupouy, 1998) sur un système de numérisation multispectral par CCD avec un dispositif d'éclairage innovant, a marqué le début du développement continu de ce domaine de recherche.

Pour une vue d'anticipation d'une version à six filtres de la caméra multispectrale datée de 1997 (voir Figure 34).

Il convient de noter que les recherches précédentes mentionnées dans cette revue de littérature avant 1998 ne se sont pas concentrées sur l'élaboration d'une caméra autonome, fonctionnelle et pratique, contrairement à celle développée dans le cadre de cette thèse. Cette dernière offre non seulement une grande précision colorimétrique, l'analyse des couches picturales, leur composition et leurs matériaux mais aussi la facilité de transport.

Initialement, l'objectif était de mettre au point un instrument de laboratoire. Cependant, l'évolution vers une caméra multispectrale intégrant haute définition et imagerie infrarouge représente une avancée significative, ouvrant des perspectives nouvelles dans de nombreux domaines, y compris mais pas uniquement, dans l'étude des palimpsestes, comme le démontrent les publications récentes. (Gysembergh et al., 2023), (Marcotte, Cotte et Cohen-Skalli, 2022).

**Considérations supplémentaires sur l'éclairage dans l'imagerie multispectrale.**

Il est remarquable de constater que la plupart des études citées sur les caméras multispectrales n'abordent pas pleinement le problème décisif de l'éclairage de la scène. Bien que certains travaux cités précédemment intègrent les spectres des sources lumineuses dans le processus de calibrage et de normalisation des images, la question de la géométrie de l'éclairage n'est généralement pas explorée en profondeur, se conformant souvent à la recommandation du CIE pour un éclairage à 45 degrés.

Pourtant la qualité de l'éclairage est décisive, influençant directement la précision des couleurs et la qualité globale des images. Il est donc essentiel d'explorer de nouvelles technologies d'éclairage ou d'améliorer les méthodes existantes pour optimiser la qualité des données visuelles obtenues. Cette exploration est vitale pour de nombreuses applications.

Cette thèse propose une approche approfondie de la gestion de l'éclairage, offrant des perspectives d'avancées significatives dans le développement de systèmes de numérisation d'images de haute qualité.

La conception du système présenté dans cette thèse repose sur un cahier des charges élaboré au cours de l'années 1999, dans un contexte marqué par l'absence de solutions disponibles répondant aux exigences de numérisation scientifique des œuvres d'art de grand format. Ce cahier des charges ne visait pas à définir des performances chiffrées idéales a priori, mais à établir un ensemble de critères qualitatifs et d'orientations technologiques permettant de guider la conception dans un objectif de qualité d'image maximale, dans les limites des technologies disponibles.

La conception de la caméra est spécifiquement orientée vers la numérisation d'objets plats de grand format avec des reliefs minimaux, tels que des peintures de chevalet, des plans, des livres et des dessins.

Les analyses de peintures nécessitent des mesures dans le spectre du proche infrarouge ; ainsi, la caméra multispectrale de cette thèse intègre trois filtres de 780 à 1050 nm pour répondre à cette exigence.

À l'origine, l'objectif fondamental était de disposer non pas seulement d'un outil de reproduction visuelle, mais d'un véritable instrument de mesure de la couleur. Or, les réflexions menées à cette époque ont rapidement mis en évidence qu'une telle exigence ne pouvait être satisfaite par la photographie numérique standard, même à haute définition. Seule une approche spectrophotométrique, fondée sur l'enregistrement d'images dans plusieurs bandes spectrales

distinctes, permettait de reconstruire les courbes de réflexion diffuse de chaque point de l'image, et par là même de calculer des coordonnées colorimétriques précises sous illuminants variables. Ce besoin de rigueur métrologique dans l'analyse de la couleur constitue l'un des fondements scientifiques du dispositif.

En parallèle, des travaux expérimentaux préliminaires menés à partir d'images RGB ont conduit à formuler une intuition technique : la possibilité d'amplifier visuellement des différences intercanaux, en superposant ou comparant des images prises dans différentes bandes. Cette idée, encore embryonnaire, allait plus tard donner naissance à la méthode L.A.M. Elle impliquait cependant une exigence forte en matière de dynamique d'image : seul un système capable de capter des écarts très faibles de luminance avec un bruit minimal permettrait d'en extraire des informations pertinentes sur la structure sous-jacente des couches picturales.

L'orientation centrale du projet était la suivante : concevoir un dispositif de numérisation multispectrale capable de fournir des images exploitables pour l'analyse scientifique d'œuvres patrimoniales, avec un niveau de précision, de fidélité et de reproductibilité dépassant largement les standards de la photographie numérique ou de la documentation visuelle en usage à l'époque. Ce cadre général s'est décliné en plusieurs axes structurants :

**Choix d'une architecture linéaire**, imposé par l'absence de capteurs matriciels haute définition : le recours à un capteur CCD linéaire s'est imposé comme la seule solution permettant d'atteindre une résolution supérieure à 200 mégapixels, condition nécessaire pour documenter la majorité des œuvres tout en conservant la microstructure picturale.

**Approche spectrale multipoints** : couvrir l'ensemble du spectre visible et proche infrarouge (environ 400-1000 nm), non pas de manière continue, mais à travers un ensemble limité mais soigneusement réparti de filtres à bande étroite, privilégiant la robustesse, la compacité et la portabilité.

**Intégration complète de la chaîne opto-mécanique** : éviter l'assemblage hétérogène de composants standards, en développant un système cohérent intégrant optique, mécanique, motorisation, calibration, filtres et synchronisation avec l'éclairage.

**Priorité à la stabilité et à la reproductibilité** : privilégier la régularité de fonctionnement et la stabilité des paramètres dans le temps, plutôt que la recherche de performances maximales ponctuelles, afin de garantir la validité métrologique des acquisitions, y compris en contexte muséal.

**Ouverture et évolutivité** : prévoir une architecture matérielle permettant l'ajout ultérieur de filtres, de modules de calibration ou d'interfaces logicielles, sans remettre en cause l'intégrité du système.

**Maîtrise fine de l'éclairage** : concevoir un système d'éclairage compatible avec les exigences de stabilité photométrique et spectrale, capable de fournir une lumière collimatée et homogène, orientable selon différents angles d'incidence, avec un flux contrôlé pour éviter toute surexposition ou échauffement des œuvres dans le respect des normes muséales (voir § 2.5.1 page 48). La synchronisation avec la caméra, la reproductibilité du faisceau, et la compatibilité avec des études sur la polarisation ou l'imagerie directionnelle figuraient également parmi les exigences initiales.

Ce cahier des charges, bien qu'ouvert et évolutif, a constitué une feuille de route déterminante pour orienter les choix technologiques qui seront détaillés dans les sections suivantes. Il visait moins à définir des seuils à atteindre qu'à structurer un processus de conception orienté vers la rigueur scientifique, la fiabilité d'usage et l'adaptation au patrimoine culturel.

### Réalisation collective de la caméra au sein de l'équipe de Lumière Technology :

Le développement de la caméra multispectrale présentée dans cette thèse a été conduit au sein de la société Lumière Technology, selon une organisation scientifique pilotée par l'auteur, président de la société et responsable de la recherche. Le concept général, les principes optiques, électroniques et méthodologiques, ainsi que l'architecture du système ont été définis dans le cadre d'un travail de recherche original, formalisé par le brevet (Cotte & Dupouy, 1998). L'auteur a assuré la définition du cahier des charges, la conduite des travaux scientifiques, les arbitrages technologiques, la recherche de financements (Investisseurs privés, ANVAR, CRISATEL), ainsi que la coordination humaine et technique du projet, dans le respect de la logique instrumentale posée par le brevet et ses prolongements conceptuels.

Une équipe composée de cinq ingénieurs a été mobilisée au sein de la société Lumière Technology pour concrétiser ces orientations dans un système fonctionnel et stable. **Marcel Dupouy**, ingénieur mécanicien, s'est distingué par son ingéniosité dans la conception des dispositifs micromécaniques, notamment le système de translation des filtres, dont la précision et la fiabilité conditionnaient la performance optique du dispositif. Il a également relevé un défi particulier avec la mise au point des projecteurs ellipsoïdes, dont la géométrie imposait des contraintes mécaniques complexes. **Thierry Hierso**, ingénieur en électronique, a assuré le pilotage et la gestion du capteur linéaire ainsi que du système d'éclairage, garantissant la cohérence des signaux acquis et la stabilité temporelle de l'ensemble. **Hervé Macudzinski**, ingénieur en informatique, a développé les algorithmes de traitement à haute densité de calcul, notamment pour le prétraitement des images brutes, la calibration et la registration. **Maximilien Roi**, ingénieur en informatique, a conçu l'interface utilisateur et les modules de commande, assurant une interaction fluide avec le système et une exploitation efficace des fonctions de numérisation. Enfin, **Damien Dupraz**, ingénieur et spécialiste de la couleur, a contribué à la définition des critères de performance colorimétrique, en apportant une expertise précieuse sur les modèles perceptifs, la restitution visuelle et la calibration spectrophotométrique. Cette réalisation illustre la synergie entre compétences scientifiques, techniques et organisationnelles réunies au sein de Lumière Technology, ainsi que la collaboration avec divers fournisseurs et sous-traitants spécialisés, qui ont contribué à transformer un concept de recherche en un instrument opérationnel de haute précision.

## 2.3 Développement de la caméra multispectrale

Le développement de la caméra multispectrale, amorcé en 1998, s'est inscrit dans un processus évolutif, marqué par des améliorations successives en mécanique optique, filtres, sources lumineuses et modes d'éclairage. Ce travail a consisté à transformer les exigences définies au cahier des charges en solutions techniques concrètes.

Ainsi, le choix et la disposition des filtres ont fait l'objet d'une conception spécifique, en particulier dans le proche infrarouge, afin de sonder efficacement les couches picturales et d'assurer une reconstruction spectrale fiable de 380 à 1050 nm. L'architecture optique a été conçue pour garantir une résolution spatiale suffisante à l'analyse des micro-détails, tout en assurant un rapport signal/bruit élevé grâce à l'optimisation de la dynamique spectrale et du temps d'exposition. Des dispositifs de calibration et de correction des aberrations ont été intégrés dès la conception, afin d'assurer la stabilité et la reproductibilité métrologique des mesures.

Le projet a également bénéficié d'un contexte de recherche collaboratif : intégration au programme européen CRISATEL (2001-2004), coopération avec la National Gallery de Londres, l'École Nationale Supérieure des Télécommunications et le C2RMF, puis, en 2003, collaboration avec le Munsell Color

Science Laboratory du Rochester Institute of Technology (Pr. Roy Berns), qui a permis de tester une caméra à huit filtres dédiée aux recherches multispectrales.

En combinant innovations optiques, électroniques et logicielles, ce développement a progressivement repoussé les limites de l'imagerie multispectrale, ouvrant la voie à des applications inédites pour l'étude des surfaces picturales complexes.

**Premier prototype à 13 filtres.**

La mise au point de la caméra multispectrale 13 filtres est achevée en 1999/2000. Elle a été livrée à l'E.N.S.T. et mise à disposition dès l'ouverture officielle du programme européen CRISATEL, en 2001, afin de permettre son évaluation technique et son application aux œuvres peintes. Elle a été le sujet d'une thèse de doctorat : « Analyse multispectrale et reconstruction de la réflectance spectrale de tableaux de maître » (Ribés Cortés, 2003).

Au cours de la phase de conception et de développement de la caméra, Lumière Technology n'a produit aucune publication scientifique avant 2003. Cette réserve s'explique par la culture de confidentialité qui prévalait alors dans l'entreprise, soucieuse de préserver des informations sensibles susceptibles d'attirer l'attention de la concurrence.

Néanmoins, la caméra a depuis fait l'objet de nombreuses publications scientifiques et communications dans le contexte académique de CRISATEL. (Lahanier et al., 2002), (Cotte et Dupouy, 2003), (Ribés et al., 2003), (Lahanier et al., 2003), (Lahanier et al., 2004), (Lahanier et al., 2002), (Dupraz et al., 2005), (Schmitt et al., 2005), (Lahanier et al., 2005), (Ribes et al., 2005), (Liang, Saunders et Cupitt, 2005), (Colantoni et al., 2006), et citées de très nombreuses fois pour les applications multispectrales. Le site *Researchgate* enregistre 289 citations à ce jour.

**Multispectrale versus hyperspectrale**

Le choix d'une caméra multispectrale repose sur plusieurs considérations techniques et pratiques. Les caméras hyperspectrales ne permettent pas d'optimiser les temps d'exposition pour chaque longueur d'onde, entraînant une faible dynamique d'image, voir la partie « Suppléments » (§ 6.1.1 page-sup. -4 -), ni d'optimiser la mise au point pour chaque longueur d'onde, leur résolution est limitée car aucune optique ne peut garantir une netteté parfaite pour toutes les longueurs d'onde de 380 à 1100 nm. En revanche, les caméras multispectrales optimisent le temps d'exposition et le focus pour chaque filtre, réduisant ainsi les bruits et optimisant la résolution et la dynamique. Les caméras hyperspectrales ont une faible résolution spatiale (SPECIM FX 1024 lignes 224 bandes spectrales, HySpex VNIR-3000[7], 3000 lignes 300 bandes spectrales) (Mandal et al., 2023), nécessitent plusieurs scans pour couvrir une œuvre entière, nécessitant un banc X, Y pour déplacer la caméra devant l'œuvre et des traitements d'images pour les accorder et causant des problèmes de jonctions et d'imprécisions, tandis que la caméra multispectrale haute définition permet une capture en un seul scan. Enfin, les caméras hyperspectrales génèrent une quantité massive de données, souvent inutile pour les mesures de spectres de réflectance des pigments de peinture, nécessitant des traitements supplémentaires pour finalement les réduire à 13 bandes spectrales pour effectuer des calculs inter-bandes (Delaney, Dooley, et al., 2017). Les caméras multispectrales produisent une quantité de données plus gérable et directement utilisable (Linhares et al., 2020). Finalement, les avantages des caméras hyperspectrales résident dans leur résolution spectrale, permettant une analyse chimique fine des matériaux. Leur capacité à identifier des pigments et des retouches les rend parfois nécessaires pour des projets de conservation

[7] https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-classic/vnir-3000-n

et de recherche avancée, tout comme une caméra FORS (*Fibre Optics Reflectance Spectroscopy*), en complément des caméras multispectrales.

*Figure 34 - Illustration de la 1ère caméra multispectrale 6 filtres de 240 mégapixels inventée 1997 (brevet 1998)*

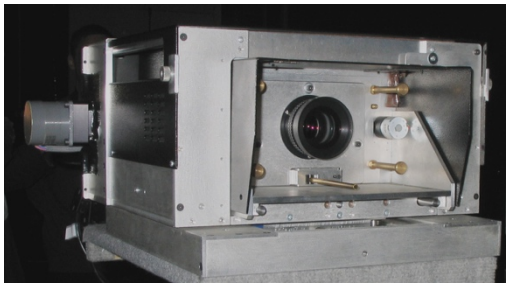


*Figure 35 - 1ère caméra multispectrale 13 filtres ultra haute définition de 240 MP (1999) qui a numérisé* La Joconde

*Figure 36 -Caméra multispectrale 13 filtres ultra haute définition de 240 MP modèle de présérie (2005)*

## 2.4 La caméra multispectrale, architecture : capteurs, filtres, optiques

La conception de la caméra est spécifiquement orientée vers la numérisation d'objets plats de grand format avec des reliefs minimaux, tels que des peintures de chevalet, des plans, des livres et des dessins. Ce critère fondamental exerce une influence prépondérante sur l'ensemble des décisions techniques et scientifiques prises dans le cadre de cette recherche. Le résultat est un ensemble constitué d'un capteur CCD linéaire, d'une optique, d'un jeu de filtres interférentiels et un dispositif mécanique de mouvement du capteur et de correction de focus.

### 2.4.1 Le capteur CCD

Le capteur CCD TH-7834C, cœur du dispositif d'imagerie multispectrale présenté dans cette thèse, a été sélectionné pour sa capacité à atteindre une très haute définition par balayage linéaire, en réponse aux limites des matrices bidimensionnelles disponibles dans les années 1990. Ce capteur, initialement développé pour le satellite SPOT 5, offre une résolution de 12 000 pixels linéaires avec une taille de pixel de 6,5 µm. En l'associant à un déplacement mécanique contrôlé sur 20 000 positions dans le plan focal, une image composite atteignant 240 millions de pixels est obtenue. Cette approche permet de contourner les limitations physiques des capteurs plans matriciels tout en assurant une grande fidélité géométrique.

Le capteur présente une large sensibilité spectrale (300-1100 nm), vérifiée expérimentalement au laboratoire de Jussieu en 2003 à l'aide d'une sphère d'intégration et d'un monochromateur. Son comportement photoélectrique est linéaire et stable, y compris sous différentes conditions d'exposition, ce qui est fondamental pour les mesures scientifiques.

*Figure 37 - Capteur CCD - TH-7834C en position dans la caméra, fixé sur sa carte électronique de gestion.* © P. Cotte

Différentes sources de bruit inhérentes aux capteurs CCD sont analysées : le bruit de grenaille (*shot noise*), dépendant de la statistique de Poisson des photons incidents ; le courant d'obscurité, limité par refroidissement thermique ; les non-uniformités de réponse (PRNU) compensées par des procédures de calibration (*flatfield*) ; et les bruits de lecture électroniques. Ces bruits définissent le rapport signal sur bruit (SNR) et la dynamique du capteur, atteignant jusqu'à 80 dB en conditions nominales, et jusqu'à 90 dB avec *binning* numérique.

Le *binning*, méthode de regroupement spatial de pixels, permet d'améliorer le SNR et la dynamique au prix d'une perte de résolution. Utilisé ici de manière ciblée pour le traitement d'image, il permet une extraction plus robuste de certaines informations dans les zones à faible signal.

L'amplification des signaux analogiques et leur conversion A/N sont assurées par deux voies parallèles, chacune dédiée à une ligne de pixels (paires/impaires), avec réglage dynamique des gains. Un usage modéré de l'amplification est privilégié afin de préserver la linéarité du signal.

Enfin, des tests de linéarité ont confirmé le comportement prévisible du capteur dans toute sa plage dynamique, avec une erreur quadratique moyenne très faible (RMSE ≈ 0,0027 sans filtre, 0,00195 avec filtre interférentiel). Cette stabilité est indispensable pour garantir la qualité métrologique des mesures multispectrales, en particulier dans le cadre d'applications patrimoniales exigeant une grande rigueur dans la restitution des intensités lumineuses.

Tous les détails techniques, résultats expérimentaux et données complémentaires relatifs au capteur CCD utilisé dans cette thèse sont présentés dans la partie « Suppléments » (§ 6.1.1 page-sup. - 2 -).

Les données sont envoyées en flux tendu en DMA. (*Direct Access Memory*) via une interface propriétaire installée dans le Macintosh (G4 ou G5) dans un slot PCI-X (*Peripheral Component Interconnect eXtended*) et le protocole série LVDS (*Low-Voltage Differential Signaling*).

### 2.4.2 L'optique, une distorsion géométrique minimum

L'optique utilisée dans le dispositif multispectral présenté dans cette thèse repose sur un objectif Rodagon 210 mm f/5.6, sélectionné pour sa distorsion géométrique minimale et sa linéarité sur l'ensemble du champ image. La précision géométrique est un impératif pour garantir la superposition rigoureuse des 13 images issues de filtres distincts. Afin de limiter les aberrations et optimiser la modulation de transfert de contraste (CTF), une architecture symétrique à six lentilles (3+3) a été privilégiée.

Une spécificité majeure du dispositif réside dans la mise au point individuelle effectuée pour chaque filtre. Cette procédure permet de corriger les aberrations chromatiques longitudinales et sagittales, et d'optimiser la netteté pour chaque longueur d'onde. À l'inverse des caméras hyperspectrales classiques, cette approche assure une CTF maximale pour l'ensemble du spectre couvert (400 à 1000 nm), tout en nécessitant un recalage géométrique ultérieur des images par redimensionnement linéaire, facilitée par l'absence de distorsions complexes.

*Figure 38 - Optique Rodenstock 210 mm fixée sur la caméra multispectrale.* © P. Cotte

Le pouvoir séparateur théorique de l'optique, évalué à partir des critères de Rayleigh et Sparrow, atteint jusqu'à 65 lignes/mm à 560 nm. Les mesures expérimentales de la CTF, réalisées à l'aide d'une mire ISO 16067-1, confirment ces performances, notamment dans les extrémités spectrales. L'alignement logiciel des images repose sur l'absence de distorsion optique significative, évitant ainsi le recours aux recalages non linéaires de type *b-spline*, plus intrusifs.

La correction de la perte de luminosité en bord d'image (vignettage) est assurée par une procédure de *flatfield*, tenant compte d'un facteur angulaire de $\cos^n(\theta)$, avec n=4 pour l'optique utilisée. Par ailleurs, la transmittance des lentilles, variable selon la longueur d'onde, est également corrigée numériquement.

La conception optique retenue, conjuguée à des réglages par filtre et à une approche rigoureuse de calibration, garantit une fidélité métrologique essentielle pour les applications scientifiques, tout en offrant une grande flexibilité d'usage, y compris en macrophotographie.

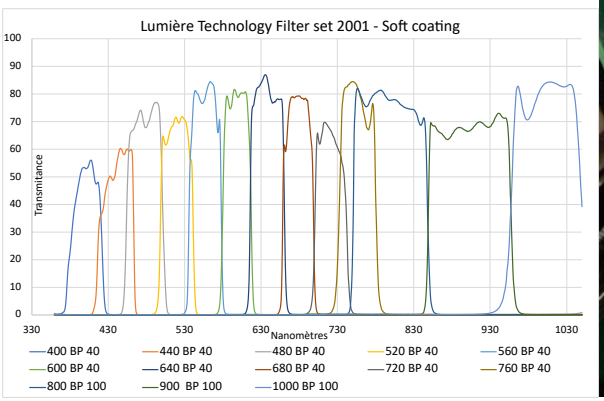
Tous les détails techniques, figures de mesure et données expérimentales sont disponibles dans la partie « Suppléments » (§ 6.1.2 page-sup. - 7 -).

### 2.4.3 Les filtres

Le système d'imagerie multispectrale repose sur un jeu de 13 filtres positionnés par un barillet motorisé entre l'objectif et le capteur. Ces filtres couvrent le spectre de 380 à 1050 nm : dix filtres passe-bande de 40 nm pour le visible et trois filtres de 100 nm pour le proche infrarouge. Le compromis visé est double : précision spectrale sans temps de pose excessifs, tout en minimisant les recouvrements entre bandes. Une position du barillet sans filtre complète l'ensemble et permet de réaliser des numérisations large bande, dites panchromatiques, couvrant à la fois le domaine visible (VIS) et le proche infrarouge (NIR).

Les filtres de première génération, conçus en 1999 selon une technologie *soft-coating* par absorption, étaient fragiles, de durée de vie limitée (2 à 5 ans) et présentaient une transmittance hétérogène avec

des recouvrements significatifs. En 2021, ils ont été remplacés par des filtres interférentiels *hard-coating*.



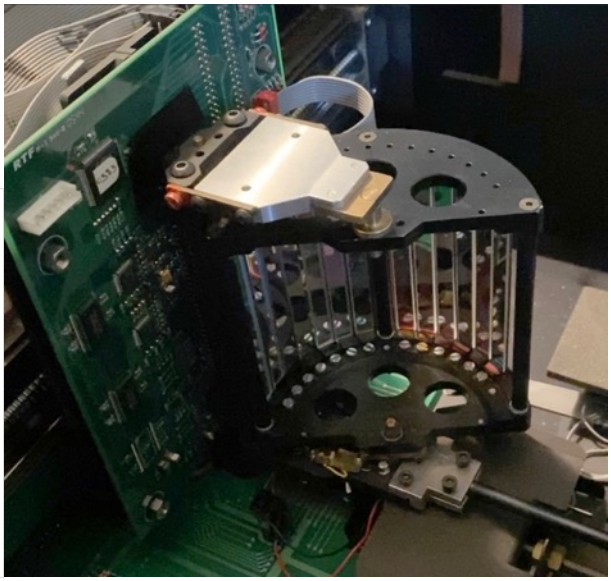



*Figure 39 - Bandes passantes des 13 filtres* - soft coating - *épais. 7 mm utilisés de 2001 à 2021 (<-)*
*Les filtres dans leur support positionnés devant le CCD dans la caméra (->).* © P. Cotte

Le choix du type de filtre influe directement sur la dynamique de l'image. Une meilleure réjection hors bande, alliée à une transmittance accrue, augmente le rapport signal/bruit et améliore la netteté.

Les équations de transmission suivent la loi de Beer-Lambert-Bouguer pour les filtres par absorption, ils sont sensibles à l'angle d'incidence. Ce point est essentiel dans une caméra où l'angle d'incidence varie mécaniquement avec la position du CCD.

Tous les détails techniques sur les deux générations de filtres, spectres mesurés, formules, comparatifs et données expérimentales sont présentés dans la partie « Suppléments » (§ 6.1.4 page-sup. - 14 -).

### 2.4.4 La mécanique

La conception mécanique de la caméra multispectrale a été pensée pour intégrer l'ensemble des fonctions optiques, électroniques et mécaniques dans un espace compact, tout en assurant l'étanchéité à la lumière et la suppression des réflexions parasites. Le système comprend six moteurs distincts, dont un dédié au déplacement micrométrique du capteur CCD, monté sur un banc de précision (Alme Star) avec une vis à billes de haute qualité. Ce dispositif permet un déplacement contrôlé avec une précision de 49 nm, essentiel pour la numérisation à très haute résolution.

La motorisation du panier à filtres repose sur un mécanisme à biellette unique, assurant le positionnement précis de chacun des 13 filtres. Un système de correction géométrique garantit que chaque filtre reste orienté perpendiculairement à l'axe optique sur l'axe de déplacement, limitant les dérives spectrales. L'optique elle-même est motorisée pour permettre une mise au point spécifique à chaque filtre ; un codeur optique assure une précision de positionnement de 0,04 mm.

Une motorisation supplémentaire du socle de la caméra avait été conçue pour ajuster mécaniquement la distance caméra-objet en fonction de la longueur d'onde, mais cette solution s'est révélée insuffisamment précise pour assurer un recalage parfait au pixel près ; elle a été remplacée par une registration logicielle. Par ailleurs, deux porte-filtres additionnels situés en aval de l'optique,

initialement prévus pour le calibrage (DSNU, PRNU), sont désormais réaffectés à des recherches expérimentales, notamment sur la polarisation de la lumière.

*Figure 40 - Détail de la mécanique intérieure de la caméra - déplacement du CCD* © P. Cotte

Des mesures précises ont permis d'identifier des résonances mécaniques à éviter lors de l'acquisition. Notamment, une fréquence critique à 0,8858 tours/s impose d'exclure les temps d'exposition avoisinant 2,9 ms. Un dispositif d'accouplement atténue partiellement les vibrations issues du moteur pas-à-pas, mais certaines plages temporelles doivent être contournées pour garantir la stabilité de l'image.

Cette architecture mécanique assure la robustesse, la reproductibilité et la stabilité requises pour des mesures multispectrales de très haute précision.

Tous les détails techniques, schémas et résultats expérimentaux relatifs à ces mécanismes sont disponibles dans la section « Suppléments » § 6.1.5 page-sup. - 22 - de la thèse.

## 2.5 Un éclairage intégré spécifique

Le dispositif d'éclairage constitue un élément déterminant dans la qualité des acquisitions multispectrales, en particulier lorsqu'il s'agit de mesurer avec précision le spectre de réflexion diffuse d'une œuvre. Ce paragraphe présente les principes retenus pour la conception et l'intégration des sources lumineuses dans le système, ainsi que leur synchronisation avec la caméra. Plusieurs paramètres essentiels ont été pris en compte dans le choix et l'optimisation des projecteurs. La puissance lumineuse doit être suffisante pour éviter le recours à des temps d'exposition longs ou à une amplification excessive, tous deux susceptibles de dégrader le rapport signal/bruit. Le spectre d'émission doit être stable et couvrant, de manière à représenter équitablement l'ensemble des longueurs d'onde détectées par le capteur, sans nécessiter de corrections numériques pénalisantes pour la dynamique de l'image. La stabilité du flux lumineux est tout aussi indispensable, afin d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des mesures sur l'ensemble des acquisitions. L'éclairage collimaté, particulièrement adapté au balayage linéaire, permet une projection contrôlée, limitant les pertes hors zone d'acquisition. La position et l'angle d'incidence des sources influent fortement sur le contraste et la lisibilité des textures ou reliefs, et permettent, selon l'orientation, d'exploiter certaines propriétés physiques de la lumière. L'ensemble du système d'éclairage a également été conçu dans un souci de compatibilité avec les exigences de conservation des œuvres : limitation de l'échauffement, suppression des UV, réduction des rayonnements indésirables. Enfin, les critères de durabilité, de rendement énergétique et de maintenance ont guidé le choix des technologies retenues.

Un tableau comparatif des sources de lumière expérimentées est présenté dans la partie « Suppléments » § 6.2.7 page-sup. - 34 -, avec les résultats des tests de performance.

### 2.5.1 Quantité de lumière projeté sur les plans de numérisation

Les normes d'éclairement pour l'exposition des objets dans les musées sont établies afin de préserver leur intégrité. Gary Thomson (Thomson, 2016), dans ses premières recommandations en 1960, a pris en compte le discernement des détails de l'objet et la vitesse d'altération. Cette décision n'était pas basée sur des calculs mathématiques, mais sur un équilibre entre ces deux facteurs. Les objets très sensibles nécessitent un éclairement minimal, généralement compris entre 10 et 30 lux, pour éviter des altérations. Les effets photochimiques de la lumière dépendent de plusieurs facteurs, notamment la présence d'oxygène et la température, qui peuvent accélérer le processus de détérioration.

Les recommandations du CIE :

CIE 157-2004, *Control of damage to museum objects by optical radiation*

Insensible : pierres, métaux, céramiques

Sensible : bois, ivoires, peintures, vernis ⟶ 0.6 Mlx.h/an

Très sensible : gravures, photos N&B ⟶ 0.15 Mlx.h/an

Extrêmement sensible : plumes, textiles, papiers ⟶ 0.015 Mlx.h/an

La loi de Bunsen-Roscoe (Jacobson et al., 2000), (London, Upton et Stone, 2013) stipule que les effets photochimiques sont proportionnels au produit de l'éclairement et de la durée d'exposition, ce qui signifie que les altérations seront équivalentes, quelle que soit la combinaison de lumière et de temps, tant que le produit reste constant. La Dose d'Exposition Totale (DET) est une mesure de cette exposition, exprimée en million de lux par heure par an (Mlx.h/an).

En partant des horaires conventionnels d'un musée, la dose d'exposition totale (DET) lors d'une acquisition multispectrale 13 filtres est équivalente à une journée d'exposition en salle à 300 lux durant 8 heures. Cela signifie que la lumière nécessaire à la numérisation multispectrale n'endommage pas davantage les œuvres que leur exposition sur les murs des musées.

Les projecteurs utilisés intègrent des filtres anti-chaleur et un dispositif anti-UV intégré aux lampes pour préserver les œuvres. Ces filtres renvoient la chaleur pour éviter tout changement de température supérieur à 5°C. Lors des séances de photographie, la température et l'hygrométrie sont également surveillées. Pour quantifier l'énergie lumineuse reçue par une œuvre, différents calculs de photométrie peuvent être utilisés, notamment ceux exprimés en lux x heure, ce qui facilite la comparaison et la vérification pour les responsables de collection de peintures.

Voir le calcul de la DET pour la numérisation de *La Joconde* au § 2.8.2 page 57.

### 2.5.2 Conception optique du miroir réflecteur des projecteurs

Afin de répondre aux contraintes spécifiques de l'imagerie multispectrale avec capteur CCD linéaire, un projecteur sur mesure a été conçu pour générer une bande lumineuse étroite, strictement limitée à la ligne en cours de numérisation. Ce dispositif réduit l'exposition globale de l'œuvre, minimisant ainsi les risques de dégradation thermique ou photochimique, et limite les réflexions internes parasites dans l'optique de la caméra (effet de *flare*), ce qui améliore netteté et contraste des images.

Le cœur du système est un miroir principal en arc d'ellipsoïde, exploitant la propriété géométrique selon laquelle les rayons issus d'un foyer convergent vers l'autre. Cette configuration assure une

**lumière collimatée sans aberration chromatique, quelle que soit la longueur d'onde**, condition décisive pour des applications multispectrales visant à exploiter l'interaction physique et optique de la lumière avec la matière picturale. Dans la version retenue, les foyers de l'ellipse sont séparés de 2 m : la largeur du faisceau projeté sur l'œuvre est de 5 cm, soit un facteur de grandissement de 40× par rapport au point source.

L'efficacité est renforcée par un miroir secondaire à section semi-cylindrique placé derrière la source, réinjectant la lumière autrement perdue vers le miroir primaire. Deux prototypes ont été réalisés : l'un en feuille d'aluminium polie plaquée sur une structure semi-ellipsoïdale nervurée, l'autre usiné dans un bloc d'aluminium massif.

Tous les détails techniques des deux versions, schémas et résultats expérimentaux relatifs à cette conception sont disponibles dans la section « Suppléments » § 6.2.2 page-sup. - 25 -.

**Les rayons collimatés horizontalement**

Placée au foyer du miroir ellipsoïdal, la source émet un rayonnement réfléchi vers le second foyer. Compte tenu du rapport entre la distance source-miroir (40 mm) et la distance de projection sur l'œuvre (2 m), les rayons peuvent être considérés comme quasi-parallèles. La lumière obtenue est ainsi collimatée horizontalement, une caractéristique dont les avantages multiples seront analysés en détail au chapitre 4.

### 2.5.3 La motorisation et la synchronisation des projecteurs

Le système d'éclairage comprend deux projecteurs disposés symétriquement de part et d'autre du plan de numérisation. Chaque projecteur est monté sur un bras motorisé articulé, dont l'axe de rotation est aligné avec le centre du reflet lumineux sur le miroir. Le déplacement est assuré par une vis motorisée parallèle au plan de numérisation, permettant un balayage uniforme de la bande lumineuse, quel que soit son angle d'incidence. Le dispositif fonctionne en boucle ouverte : la synchronisation des deux projecteurs repose sur une calibration initiale et sur la mémorisation par la caméra de leurs vitesses respectives. Ce système produit deux lignes lumineuses convergentes, formant une croix de lumière au sol et au plafond, matérialisant la zone d'éclairement optimale. L'angle d'incidence des faisceaux, paramétrable par l'opérateur, permet d'adapter l'éclairage aux exigences de chaque type d'analyse.

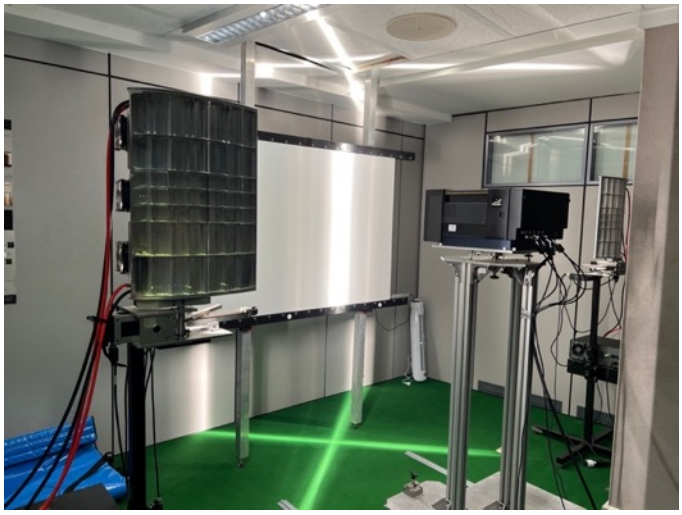


*Figure 41 - Les projecteurs, équipés de miroirs monoblocs aluminium, sont positionnés symétriquement au plan de numérisation. Ils produisent une bande de lumière collimatée étroite (ici, tungstène-halogène).*

Le déplacement des projecteurs est assuré par l'envoi d'ordres transmis via une liaison série RS232 à une interface intégrée à la caméra. Les impulsions de commande sont ensuite générées par cette interface et appliquées directement au moteur au moyen d'une connexion filaire.

Tous les détails techniques, relatifs à cette conception sont disponibles dans la section « Suppléments » § 6.2.3 page-sup. - 27 -.

## 2.6 Reconstruction des images

La reconstruction des images obtenues par la caméra multispectrale repose sur un enchaînement rigoureux d'opérations optiques, mécaniques, électroniques et algorithmiques. À partir des 13 images monochromes obtenues par balayage linéaire sous 13 filtres interférentiels, le dispositif produit un cube de données (hypercube) où chaque pixel est associé à un vecteur spectral couvrant la gamme de 380 à 1050 nm. L'ensemble du processus vise à restituer, pour chaque point du plan de l'œuvre, une réflectance spectrale fidèle, base de toute analyse physique, colorimétrique ou spectrale.

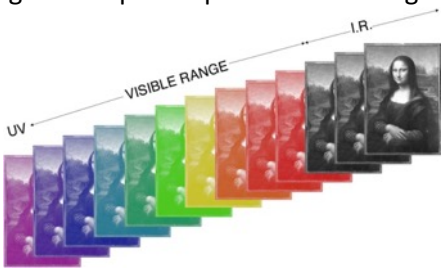



*Figure 42 - Hypercube de données multispectrales mesurées sur* La Joconde © P. Cotte

La première étape consiste à calibrer la réponse du capteur. Un panneau blanc en téflon, de réflectance connue, est placé dans le plan de numérisation. Il permet de régler les temps d'exposition et les gains pour chaque filtre, en s'approchant du seuil de saturation sans le dépasser. La caméra travaille idéalement à faible gain (inférieur à 8 dB) afin de maximiser le rapport signal/bruit. Ce processus garantit une homogénéité d'exposition entre canaux et une utilisation optimale de la dynamique du capteur.

Vient ensuite une étape essentielle de correction des non-uniformités : pour chacun des 13 filtres, on acquiert des images noires (*dark frames*) avec l'optique obturée, ainsi que des images de référence sur panneau de téflon blanc éclairé (*white frames*), utilisées pour l'opération de *flat-field*. Ils permettent de modéliser et compenser les principaux bruits : courant d'obscurité, bruit de lecture, PRNU (*Photo Response Non-Uniformity*), vignettage, défauts d'éclairage, transmittance optique, sensibilité spectrale du capteur, et réponse des filtres. Une équation générale de correction du pixel, intégrant ces paramètres, permet d'obtenir pour chaque canal une image corrigée, dite « normalisée ».

À cette étape, chaque image monochrome est géométriquement cohérente, mais les variations de focale selon la longueur d'onde entraînent des variations d'échelle linéaires. Il est donc nécessaire d'appliquer un recalage *subpixel* rigoureux (registration), effectué par détection des mires de repérage fixées autour de l'œuvre. Une interpolation fondée sur une fonction de transfert garantit que chaque pixel superposé à travers les 13 couches correspond au même point physique du tableau.

Une fois cet hypercube recalé, la reconstruction des spectres de réflectance peut débuter. Chaque pixel est alors associé à 13 valeurs d'intensité, correspondant à la lumière réfléchie à travers chaque filtre. La caméra étant conçue comme un échantillonneur de spectre (avec un pas spectral de 40 nm dans le visible et 100 nm en IR), il est possible d'interpoler ces données pour retrouver une courbe continue de réflectance tous les 10 nm. Pour cela, différentes méthodes ont été explorées (*splines*, inversion pseudo-inverse, CNN, etc.), mais la méthode PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) s'est révélée la plus fiable, car elle garantit le passage exact par les points mesurés tout en conservant leur monotonie, évitant ainsi les oscillations parasites des autres méthodes.

Cette courbe spectrale, obtenue pour chaque pixel, permet ensuite de recalculer la couleur perçue sous un illuminant standard (D65 ou autre), en intégrant les spectres reconstruits aux fonctions de correspondance colorimétrique de la CIE (XYZ puis LAB). L'utilisateur peut ainsi, après la numérisation, choisir l'illuminant le plus pertinent pour simuler la perception des couleurs dans des conditions muséographiques variées. Il devient également possible d'exporter des images en RGB fidèles à la vision humaine, ou de produire des cartes colorimétriques LAB exploitables pour la documentation scientifique ou la conservation.

Enfin, la dynamique élevée du capteur, exigée dès l'origine pour la méthode L.A.M., permet de détecter les infimes variations spectrales ou chromatiques, souvent invisibles à l'œil nu. C'est cette

richesse des données brutes, combinée à une rigueur méthodologique, qui fait de ce système un véritable instrument de mesure, au-delà de la simple image.

**Évaluation des performances spectrales et colorimétriques de la caméra**

Les performances de la caméra ont été évaluées selon deux axes complémentaires : la précision spectrale, c'est-à-dire la fidélité de la reconstruction des courbes de réflectance sur la plage 380-1050 nm, et la précision colorimétrique, définie comme l'écart entre la couleur reconstruite (à partir des spectres interpolés) et la couleur mesurée par un spectrophotomètre de référence.

Ces évaluations ont porté sur plusieurs échantillons de test, représentatifs de la diversité des matériaux artistiques (pigments, liants, vernis). Les résultats montrent une très bonne concordance entre les spectres reconstruits par la caméra et ceux mesurés en laboratoire, avec des résidus de reconstruction faibles et une dérive colorimétrique inférieure au seuil perceptible ($\Delta E_{00} < 1,5$ dans la majorité des cas). Ces performances, stables dans le temps et homogènes sur l'ensemble du champ image, valident l'usage du système comme instrument de mesure fiable dans le domaine de l'imagerie patrimoniale à haute exigence scientifique.

Tous les détails techniques de la caméra se trouvent dans la partie « Suppléments » :

- Installation de la caméra (§ 6.3.1 page-sup. - 35 -),
- Réglages des focus (§ 6.3.2 page-sup. - 36 -),
- Réglages des gains et temps d'exposition (§ 6.3.3 page-sup. - 36 -),
- Évaluations des qualités numériques et visuelles de la caméra (§ 6.3.4 page-sup. - 36 -),
- Équation générale de correction du pixel (§ 6.3.5 page-sup. - 38 -),
- Le *Flatfield* (§ 6.3.6 page-sup. - 39 -),
- Numérisation et normalisation des images (§ 6.4 page-sup. - 42 -),
- La correction de blanc (§ 6.4.2 page-sup. - 42 -),
- La régistration des images (§ 6.4.3 page-sup. - 43 -),
- La méthode PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) pour la reconstruction des spectres et validation de la reconstruction spectrale (§ 6.5.2 page-sup. - 47 -),
- La reconstruction des images couleur (§ 6.6 page-sup. - 51 -)
- Mesures de la précision des spectres et de la colorimétrie. (§ 6.6.3 page-sup. - 54 -)

## 2.7 État de l'art des caméras multispectrales après 2004 et évolutions

**Étymologie :**

Avant d'aborder les évolutions instrumentales, il convient de préciser la terminologie employée, dont l'usage a lui-même évolué au fil des décennies. Le terme "multispectral" n'était que très rarement employé dans les années 1990 pour désigner des caméras destinées à des usages muséographiques ou scientifiques en laboratoire. Bien qu'il soit attesté dans la littérature scientifique dès les années 1960-70, son usage était alors essentiellement réservé au domaine aéronautique ou spatial, notamment dans le contexte de la télédétection par satellite (Hoffer et Miller, 1965). La première occurrence documentée dans le champ patrimonial semble apparaître dans une publication de 1995 (Keusen, 1995). Toutefois, à la même période, la majorité des publications européennes et américaines privilégient encore les expressions de "*multi-channel imaging*", "*multi-band acquisition*", ou même de "*multi-wavelength photography*". Le terme « imagerie multispectrale » ne s'est généralisé qu'au début des années 2000, y compris dans les publications de conservation, d'archivage et d'analyse physico-chimique. Aujourd'hui, le site *ResearchGate* recense plus de 54 000 occurrences du terme « multispectral » ; la diffusion de cette approche dans le domaine du patrimoine doit sans doute autant à la caméra décrite dans cette thèse qu'à sa mise en œuvre sur une œuvre emblématique comme *La Joconde*, dont la notoriété mondiale a amplifié la visibilité des résultats auprès de la communauté scientifique.

**Les caméras multispectrales :**

L'analyse qui suit se limite volontairement aux systèmes multispectraux, au sens restreint du terme, c'est-à-dire fondés sur une acquisition image par image selon des bandes spectrales discrètes à l'aide de filtres optiques ou d'éclairages séquentiels. Sont explicitement exclus de cette recension les dispositifs hyperspectraux, dont le principe repose sur la capture continue d'un spectre pour chaque pixel, souvent via des fentes de diffraction ou des interféromètres, et pour lesquels aucune étape de reconstruction spectrales n'est nécessaire. Les problématiques techniques, méthodologiques et instrumentales sont en effet radicalement différentes, tant sur le plan optique que sur celui du traitement des données.

**Essor et dissémination :**

L'usage encore marginal du terme « imagerie multispectrale » ou MSI dans les années 1990 contraste avec son essor au début des années 2000, porté par les avancées en optoélectronique, le développement de capteurs dédiés, la montée des exigences muséales et la diffusion des outils de traitement spectral. Plusieurs dispositifs ont alors vu le jour. Plusieurs travaux, tels que celui de (Colantoni et Thomas, 2009), se sont référés à la caméra développée dans cette thèse pour élaborer des approches en gestion colorimétrique, la désignant sous le nom de « CRISATEL ». Cette appellation s'explique par l'absence, à l'époque, de toute communication de Lumière Technology sur ce système, devenu connu à travers son intégration au programme CRISATEL et les publications scientifiques qui en ont découlé. La caméra a notablement marqué la communauté scientifique comme en témoignent les nombreuses de citations, dont certaines récentes (Bonifazzi et al., 2006), (Bellucci et al., 2007), (Palomero et Soriano, 2011), (Lucet, 2013), (Shrestha et Hardeberg, 2014), (Pingi, 2016), (Matanga, 2020).

Parmi les évolutions notables, on observe un intérêt croissant pour les systèmes de filtres à bandes étroites, comme ceux développés initialement dans la présente caméra. La logique de capture image par image selon des longueurs d'onde discrètes a été reprise dans plusieurs projets académiques et industriels. Citons par exemple, (Papadakis et al., 2011), (Bianco, Bruno et Muzzupappa, 2013) (Cosentino, 2015).

Une version stéréo a été étudiée (Shrestha, Mansouri et Hardeberg, 2011) ainsi qu'une version *« low cost »* démocratisant le procédé (Kleynhans et al., 2021).

**Progrès de la caméra exposée dans cette thèse :**

Le dispositif décrit dans cette thèse a lui-même connu plusieurs améliorations notables au fil du temps. La source lumineuse initiale, fondée sur des projecteurs aux halogénures, présentait un temps de stabilisation spectrale de près de deux heures. En 2021, cette source a été remplacée par un éclairage au xénon, thermiquement stabilisé, dont le flux lumineux a été mesuré à 120 Klux par projecteur et le flux spectral devient stable en moins de dix minutes (voir § 6.2.6 page-sup. - 32 -). Parallèlement, la durée d'acquisition complète d'un tableau a été réduite, passant d'environ deux heures à 30 minutes, sans compromis sur la stabilité ou la précision des mesures. Ce bénéfice est dû essentiellement à l'augmentation du flux lumineux, mais environ 15 % de ce gain est attribuable aux nouveaux filtres interférentiels *hard-coating* à partir de 2021 (voir § 6.1.4 page-sup. - 14 -). Outre leur transmittance supérieure et leur meilleure séparation spectrale, ces filtres présentent une uniformité spectrale accrue et une densité optique plus élevée, réduisant significativement la lumière parasite hors bande passante. Ils ont également permis une amélioration de la dynamique d'image, en augmentant le rapport signal sur bruit et en optimisant l'usage de la pleine échelle du capteur (voir § 6.1.1 page-sup. - 2 -). Ces perfectionnements ont permis de renforcer la robustesse instrumentale du système, sans en altérer l'architecture ni la philosophie initiale.

**Évolution du domaine spectral :**

Au-delà des améliorations instrumentales, le champ spectral couvert par les caméras multispectrales s'est lui aussi progressivement élargi. Plusieurs dispositifs récents visent à intégrer le SWIR (*Short-Wave Infrared*), s'étendant approximativement de 1000 à 2500 nm avec notamment les travaux de l'INO du CNR italien (Daffara and Fontana, 2011, p. 693), (Jenal et al., 2023) ou (Delaney et al., 2024). Ce domaine spectral présente un intérêt croissant pour l'étude des matériaux organiques, des liants, ou des vernis, ainsi que pour la détection de phénomènes physico-chimiques profonds dans les couches picturales. Une telle extension nécessite toutefois le recours à des capteurs spécifiques (de type *InGaAs*), à des optiques transparentes dans l'infrarouge lointain, et à des filtres adaptés, rendant ces dispositifs plus coûteux et plus complexes à stabiliser et des résolutions spatiales très nettement inférieures.

**LED et caméra matricielles monochromes :**

Outre ces travaux fondés sur des filtres fixes, une autre orientation technologique a émergé avec l'utilisation de LED multispectrales comme alternative aux systèmes filtrés associés à un capteur matriciel (Wilson, France et Bolser, 2018), (Amiri, Messinger et Hanneken, 2024), (Mazzocato, Cimino et Daffara, 2024). Ces dispositifs offrent l'avantage de la compacité et de la facilité d'intégration mais restent limités en résolution effective, en sélectivité spectrale et en dynamique d'image. À l'heure actuelle, le capteur matriciel monochrome offrant la plus haute définition commerciale (Sony IMX411) atteint 150 mégapixels (Alarcon et al., 2023), ce qui reste nettement inférieur à la résolution du système présenté dans cette thèse. Canon a récemment annoncé avoir en développement d'un capteur de 410 mégapixels[8] au format 35 mm ; néanmoins, son exploitation en conditions scientifiques impliquerait d'activer le *binning* pour améliorer le rapport signal/bruit, réduisant ainsi la résolution utile d'un facteur 4, mais aussi afin de respecter les limites imposées par la MTF optiquement utiles.

**Capteur matriciels multispectraux :**

Enfin, à la croisée des logiques d'allègement matériel et de rapidité d'acquisition, plusieurs travaux ont exploré l'intégration directe des filtres à l'échelle du capteur, donnant naissance aux capteurs matriciels multispectraux (Thomas, Lapray et Le Moan, 2025). L'apparition de caméras multispectrales compactes à capteurs matriciels (par exemple Ximea, Silios, FluxData, Photonfocus) offre des perspectives intéressantes en termes de portabilité, mais leur résolution reste largement inférieure, et la maîtrise fine des longueurs d'onde est souvent limitée par des compromis optiques ou des traitements internes (Lapray et al., 2017). Ces capteurs intègrent, sur des blocs de pixels, des filtres optiques discrets déposés directement à la surface du détecteur, selon des matrices régulières (2x2, 3×3, 4×4). Bien que certains capteurs atteignent jusqu'à 16 bandes, la majorité de ces dispositifs restent limités à 4 longueurs d'onde. Ils présentent des défis importants en matière de séparation spectrale et d'interpolation spatiale, malgré l'avantage déterminant qu'ils offrent pour les applications requérant des acquisitions rapides et des systèmes compacts. Ces capteurs sont notamment utilisés dans des systèmes d'imagerie multispectrale portables ou embarqués, et sont exploités dans des dispositifs hybrides associant multispectral et RTI (*Reflectance Transformation Imaging*), où la rapidité de capture est primordiale.

**Multispectral et R.T.I. :**

Des travaux récents tels que ceux de (Castro et al., 2022) et (Siatou et al., 2022) menés au sein du laboratoire IMVIA (Université de Bourgogne), ont proposé un cadre unifié combinant RTI et imagerie multispectrale matricielle. Ces contributions illustrent le potentiel de ces approches hybrides dans le contexte patrimonial.

[8] https://global.canon/en/news/2025/20250122.html

Le RTI permet d'associer informations spectrales et topographiques de surface et consiste à fixer la caméra tandis que la source lumineuse balaie des angles variés. Ces variations d'illumination permettent de modéliser localement la fonction de réflectance bidirectionnelle (BRDF) des surfaces, révélant des détails topographiques (reliefs, incisions, usures) impossibles à percevoir en lumière diffuse. Ces articles démontrent la faisabilité d'obtenir simultanément des *maps* de normalisation et des spectres réels, ouvrant de nouvelles perspectives pour une documentation visuelle, matérielle et morphologique des surfaces patrimoniales, tout en soulignant leurs limites actuelles en termes de résolution spectrale et de calibration photométrique. Des expérimentations similaires ont été menées dans le cadre du projet R-CHIVE ou encore par (Ono et Matsuda, 2019), qui ont évalué l'apport du RTI multispectral dans l'analyse de surface après nettoyage de vernis.

**Palimpsestes : nouvelles utilisations du multispectral :**

Par ailleurs, l'imagerie multispectrale a connu depuis une quinzaine d'années un développement marqué dans le champ de la numérisation des palimpsestes, c'est-à-dire de manuscrits anciens dont le texte originel a été effacé ou recouvert. Grâce à la capture, par filtres ou par LED, dans des bandes spécifiques du proche infrarouge, et à la possibilité d'effectuer des traitements différentiels entre canaux, il est devenu possible de révéler des écritures invisibles à l'œil nu. La capacité à capturer des bandes du proche infrarouge permet de dissocier l'encre sous-jacente de l'encre de surface recouvrante, rendant lisibles des inscriptions effacées ou révélant des écritures oubliées. Le projet *Archimedes Palimpsest* (Walters Art Museum, Baltimore 2002-2011), (Easton, Christens-Barry et Knox, 2011), a ouvert la voie à cette approche et est un exemple pionnier, démontrant l'efficacité de la méthode. Depuis, des campagnes ont été menées sur des manuscrits syriaques, coptes ou grecs (Gysembergh et al., 2023), (Marcotte, Cotte et Cohen-Skalli, 2022), et plusieurs laboratoires de conservation ont intégré l'imagerie multispectrale comme outil standard pour la restitution de textes perdus, avec des algorithmes dédiés à la séparation de couches et à l'analyse PCA des spectres de contraste (Arsene et al., 2017).

Ce positionnement méthodologique est conforté par l'analyse comparative menée dans le projet *Making Light Work* (Davies et Zawacki, 2019). Celui-ci, centré sur l'imagerie de manuscrits anciens, précise dans sa note 1 de la page 191, dans le cadre de la numérisation des palimpsestes, « *the tradeoff is that although HSI (hyperspectral imaging) obtains high spectral resolution, it offers comparatively poorer spatial resolution. This latter is the more valuable when seeking to recover lost text and images, making MSI generally the preferred tool for such a task.* » Autrement dit, la résolution spatiale élevée - caractéristique intrinsèque des systèmes multispectraux - s'avère plus déterminante que la finesse spectrale lorsque l'objectif est de faire réapparaître des inscriptions effacées. Ce constat conforte l'idée selon laquelle le multispectral, lorsqu'il est bien calibré et accompagné d'un traitement algorithmique rigoureux, constitue aujourd'hui la méthode la plus efficace pour la relecture non destructive de palimpsestes.

Ce panorama montre que, bien que le champ se soit élargi, les principes posés dès 2000 - haute résolution, stabilité spectrale, reproductibilité, reconstruction quantitative - demeurent structurants pour l'imagerie multispectrale patrimoniale. Ils ont non seulement inspiré des travaux ultérieurs, mais continuent de constituer une référence dans les projets visant à allier fidélité visuelle, précision des mesures et respect des œuvres originales.

## 2.8 La numérisation multispectrale de *La Joconde*

Il convient de noter que l'analyse scientifique des œuvres d'art au sein des collections publiques françaises incombe aux Laboratoires Publiques. Néanmoins, dans certaines circonstances exceptionnelles, notamment lors de l'introduction de technologies innovantes, il peut s'avérer nécessaire de déléguer cette tâche à d'autres laboratoires ou aux créateurs de la technologie concernée. Cette délégation se justifie par le fait que, lorsqu'il s'agit de manipuler un prototype inédit, les concepteurs eux-mêmes sont les seuls à pouvoir en définir précisément les limites opérationnelles, en raison de leur connaissance approfondie de leur invention.

Comme mentionné après l'introduction de ce chapitre, la caméra multispectrale, développée entre 1998 et 2000, a été validée pour une utilisation sur des œuvres d'art par les Membres muséaux du programme européen CRISATEL, initié en septembre 2001. Le rapport final de Lumiere Technology concernant la partie dédiée à la caméra multispectrale a été soumis et approuvé par la Commission Européenne le 31 août 2004. C'est ainsi que le musée du Louvre et le laboratoire des Musées, en dehors du cadre européen CRISATEL, ont sollicité l'auteur en septembre pour la numérisation de *La Joconde*. Cette demande, accueillie dans un esprit de collaboration scientifique, a conduit à la numérisation effective de l'œuvre, réalisée le 19 octobre 2004 à l'aide du prototype de la caméra multispectrale décrite dans cette thèse et dans le cadre d'un nouvel accord de confidentialité.

Deux séries de mesures de ce célèbre chef-d'œuvre ont été réalisées : La première numérisation, couvrant l'intégralité de la peinture à une résolution de 372 dpi, a débuté vers midi. La seconde, focalisée uniquement sur le visage, a été effectuée à une résolution de 1523 dpi, débutant en soirée et se prolongeant jusqu'au matin suivant, vers 8 heures. Ces travaux ont déjà été l'objet de publications scientifiques (Cotte et Dupraz, 2006b) (Mohen, 2006), (Ribes et Schmit, 2008), soulignant l'importance et la portée de cette recherche.

### 2.8.1 Installation de la caméra multispectrale

Outre les précautions impératives requises lors de la manipulation de chefs-d'œuvre à la fois précieux et fragiles, des expérimentations d'une extrême précision et de nature confidentielle ont été conduites sur cette œuvre exceptionnelle. Le dispositif nécessaire a été préalablement installé dans le studio photographique du laboratoire du musée du Louvre plusieurs jours avant l'intervention, afin de concevoir un support spécialement adapté pour maintenir le tableau et de mener une série de tests préliminaires. Un modèle substitutif, de dimensions similaires et basé sur les données techniques issues des archives de l'œuvre, a été employé pour ajuster le positionnement de la caméra et du système d'éclairage.

*Figure 43 - Installation de la caméra multispectrale devant* La Joconde *le 19 octobre 2004*

Le chevalet utilisé est un pupitre motorisé modifié pour maintenir *La Joconde* en appliquant une pression contrôlée directement sur le support en bois. Le cadre de contention en chêne, modifié en 1951 pour renforcer le panneau déformé, a été spécialement retiré pour les numérisations (voir Figure 44) ne laissant que la planche nue. L'objectif de cette fixation spécifique est de permettre le positionnement des mires de référence et des cibles de résolution nécessaires lors de l'étape de redimensionnement des images. Cette étape est déterminante, étant donné que la surface du tableau doit être alignée avec les cibles de résolution (voir Figure 45). Étant donné que la surface de l'œuvre n'est pas parfaitement plane mais bombée de 8 mm environ en son centre, des choix techniques, tels que la gestion des réflexions spéculaires, la profondeur de champ et la mise au point, ainsi que des choix esthétiques, ont été effectués en se basant sur des méthodes spécifiques à la photographie et sur la connaissance approfondie de l'auteur du comportement spécifique du système d'éclairage tout en garantissant le respect de la géométrie d'incidence fixée à l'angle de Brewster.

Le prototype de la caméra était équipé des filtres *soft-coating* décrits au § 6.1.4, page-sup. - 14 -, des lampes HQI décrites § 6.2.3 page-sup. - 27 -.

*Figure 44 - Pascal Cotte devant le panneau de* La Joconde*, sans son cadre de contention (←)*
*Figure 45 -* La Joconde *positionnée sur le chevalet (→)*

La distance entre le tableau et la caméra est déterminée par la taille de l'œuvre à numériser et par la longueur focale de l'objectif, fixée à 241 cm du centre optique afin que les 12 000 pixels du CCD couvrent toute la hauteur du tableau. Il est impératif que le plan de l'image soit parallèle au plan de l'objet pour garantir la netteté des angles. Cet alignement est réalisé à l'aide d'un laser placé sur le plan objet et dirigé directement sur le CCD après avoir préalablement retiré l'optique de la caméra.

Les projecteurs ont été positionnés à ≈ 1 m du bord du tableau pour donner un angle d'incidence du rayon de lumière collimatée qui varie entre 57.5° à 66.5° à gauche et 56.5° à 65.8° à droite pendant le balayage du faisceau lumineux (voir Figure 46), minimisant ainsi les réflexions spéculaires. Cet angle spécifique appelé angle de Brewster a été calculé pour tenir compte de l'indice $n$ de réfraction variable des vernis [$\theta_{Brewster} = \tan^{-1}(n = 1.51) \approx 56.5° \; ou \; \tan^{-1}(n = 1.55) \approx 57.5°$]. Voir les détails et les avantages d'un tel mode d'éclairage au § 4.1, page 95. L'idéal aurait été de numériser en format paysage avec la courbure parallèle au faisceau lumineux focalisé, mais par précaution et afin d'éviter toute pression du chevalet dans le sens contraire des fibres du bois, cette option n'a pas été retenue.

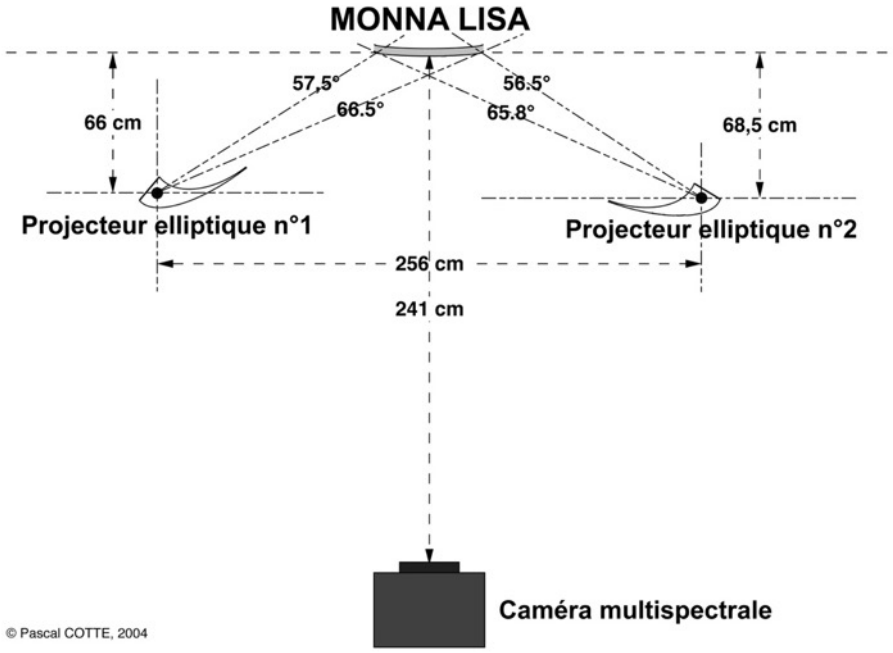



*Figure 46 - Plan d'installation de la caméra et des projecteurs à l'angle de Brewster pour* La Joconde *publié en 2004*

### 2.8.2 Contrôle de l'exposition

Il a déjà été souligné l'importance de la prévention dans la conservation des œuvres d'art, comme mentionné dans le § 2.5.1 page 48. Après avoir constaté qu'il n'y avait aucune détérioration sous un éclairage intense de projecteurs à quatre lampes HQI, l'éclairage a été ajusté à 30 000 lux dans la bande étroite de lumière. Cette bande, d'une largeur de 50 mm environ, diminue rapidement à moins de 800 lux (voir Figure 47). La dose totale d'exposition (D.E.T.) en millions de lux-heures (Mlxh) est calculée en connaissant le nombre total de pixels horizontaux, $n$, et le temps total d'intégration, $t$ en ms. Le tableau a été exposé uniquement au faisceau lumineux entre les points 0 et 779 mm pour chaque passage. La D.E.T. est donc donnée par l'équation suivante :

$$DET = \int_0^{779} f(x)\left(\frac{n \times t}{3.6 \cdot 10^6}\right) \times 2dx \qquad \textit{Eq. ( 4 )}$$

$f(x)$ représente la fonction de distribution de l'éclairage sur la zone de numérisation. L'éclairage résiduel, à l'exception du faisceau concentré, est plus large que la zone de numérisation exposant le chef-d'œuvre à l'ensemble de l'éclairage distribué sur le double de la zone de numérisation. La D.E.T. pour la prise No. 1, où $n$ = 11 409 pixels et $t$ = 480,5 ms, est de 0,015 Mlx.h. Pour la prise No. 2, détaillant le visage à 1523 dpi, où $n$ = 20 000 pixels et $t$ = 102,7 ms, la D.E.T. est de 0,005 Mlx.h.

En comparaison, dans son ancien écrin, *La Joconde* était exposée à 180 lux pendant 9 heures par jour, équivalent à 0,00162 Mlx.h. Ainsi, toutes les numérisations multispectrales correspondent à douze

jours d'exposition dans le musée. Les projecteurs comprenaient des filtres thermiques et un stabilisateur UV pour protéger l'œuvre. Le microclimat de la salle a été minutieusement surveillé par des capteurs connectés par ondes radio à un ordinateur central qui enregistrait en temps réel les variations de température et d'humidité. Un capteur supplémentaire, placé sur le chevalet, surveillait les fluctuations locales. La température et l'humidité relative ont été maintenues à 20,3 °C et 50 %, respectivement, et n'ont été ajustées qu'une seule fois, en l'absence de l'œuvre lors de l'allumage de l'éclairage. Des mesures de précaution limitaient la présence à quatre personnes dans la salle durant les séances de photographie. Des mesures de température sur le tableau lui-même ont été effectuées avec un thermomètre infrarouge (voir Figure 48), sans enregistrer d'augmentation supérieure à 1 °C.

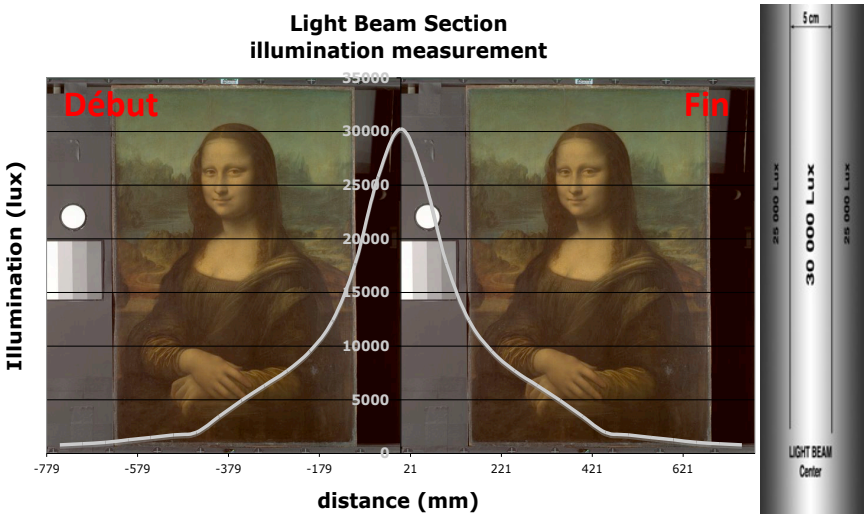



*Figure 47 - Position de* La Joconde *par rapport à la bande lumineuse au début (←) et à la fin (→) de la numérisation. La courbe grise représente l'intensité lumineuse, synchronisée avec le déplacement du CCD au maximum d'intensité. L'éclairage hors bande centrale atteint les parties non numérisées.*

*Figure 48 - Mesure de la température sur* La Joconde *pendant le balayage du faisceau lumineux*

La mesure de la température et de l'exposition aux UV a été réalisée avec un "UV LIGHT METER LUTRON" modèle UV 340, pour garantir que l'acquisition n'endommage pas l'œuvre. Rappel des plages spectrales des UV : UV-A de 320 à 400 nm, UV-B de 290 à 320 nm, et UV-C < 280 nm.

La dose d'UV-A mesurée pendant les acquisitions reste infime (22.5 µW/cm$^2$/heure) et correspond à l'équivalent d'une seconde d'exposition au soleil de midi. Pour les deux numérisations, les valeurs mesurées des doses d'exposition totale aux UV-A sont les suivantes :

UV-A DET = 2.25 x $10^{-5}$ MµW/cm$^2$/h
UV-A DET = 2.06 x $10^{-5}$ MµW/cm$^2$/h (le visage seul)

Le Tableau 2 résume les conditions d'acquisition, y compris la dose d'exposition totale (TED), l'humidité relative (RH), la température ambiante, et l'intensité lumineuse en µW/Lumen.

| TED (Mlxh) | RH (%) | Température (°C) | UV µW/Lumen |
|---|---|---|---|
| 0.038 | 50 | 20.3 | 13.4 |

*Tableau 2 - Synthèse des conditions d'acquisition*

### 2.8.3 Réglages de la caméra et calibrage

Après l'installation du matériel, la configuration de la caméra est effectuée à l'aide de son logiciel de pilotage, dont le rôle est d'optimiser la qualité des images tout en réduisant le temps d'acquisition. L'objectif poursuivi est la production de données visuelles nettes, géométriquement fidèles et présentant un niveau de bruit minimal. Une maîtrise approfondie du fonctionnement de la caméra, ainsi que de l'impact des principaux paramètres de réglage (ouverture, gain, temps d'intégration), est indispensable pour atteindre ces conditions.
Cette étape est suivie d'un processus de calibrage systématique, visant à compenser les défauts instrumentaux et optiques : enregistrement et correction du bruit de fond, des variations inter-pixels, de la non-uniformité de l'éclairage et du vignetage de l'objectif.
Une fois ces opérations achevées, l'œuvre est positionnée sur le chevalet pour l'acquisition des images. Celles-ci feront ensuite l'objet d'un traitement spécifique destiné à en extraire et interpréter l'information scientifique.

**Réglages optiques**

Les calculs optiques indiquent une profondeur de champ théorique de 12.59 mm sur le tableau, avec un diaphragme réglé à f/8. Étant donné la courbure d'environ 8 mm du panneau de peuplier, documentée dans les archives techniques et observée visuellement, il a été décidé de doubler les numérisations effectuées avec les filtres les plus rapides (520-680 nm) en utilisant un diaphragme à f/11 pour augmenter la profondeur de champ à 19 mm. L'objectif, doté d'une formule optique symétrique, offre un rapport de grossissement de 10,5. Les aberrations chromatiques sont corrigées par le déplacement motorisé de l'objectif (voir Figure 163 page-sup. - 8 -). La résolution effective de la caméra est mesurée avec la mire ISO 16067 (voir Figure 165 page-sup. - 12 -). La CTF pour la résolution de *La Joconde* à 372 dpi, soit 14.6 lignes/mm donne une CTF moyenne de 60%, et de 99% après traitement logiciel.

**Réglages des gains**

En sortie du CCD, l'amplificateur de gain programmable permet un ajustement du gain dans une plage allant de -6 dB à 42 dB, avec une progression linéaire par incréments dB, (voir Tableau 12 page-sup. - 6 -). Cette progression linéaire signifie que les variations du gain sont uniformes en termes de décibels, et non en gain brut (qui serait exponentiel en fonction de l'échelle logarithmique des dB). Les réglages des gains pour chaque filtre spectral sont les suivants :

| Filtres : | 400 | 440 to 900 | 1000 |
|---|---|---|---|
| Gain (dB) : | 15 | 9 | 22 |

*Tableau 3 - Réglages des gains pour chaque filtre*

Le choix de ce réglage (voir Tableau 3) est un compromis pour réaliser la numérisation dans un créneau horaire déterminé tout en conservant une excellente qualité. Le diaphragme et le gain étant fixés, le système détermine pour une mire de blanc calibrée un temps d'exposition pour chaque filtre entre 1.3 ms et 200 ms. Pour la séquence réalisée à f/11, les temps d'exposition ont été doublés et les réglages de gain conservés.

**Calibrage de la caméra**

Toutes les images produites par la caméra sont calibrées et normalisées suivant les procédures décrites aux sections § 6.3.6, page-sup. - 39 -, § 6.4.2, page-sup. - 42 - et § 6.4.3, page-sup. - 43 -

### 2.8.4 Acquisition des images

La séance de prise de vue s'est déroulée en deux phases principales : d'abord, une photographie globale de l'œuvre (1), suivie d'une macrophotographie (2) centrée sur le visage (voir Figure 49). Une première série de 18 photographies (13 à f/8 et 5 à f/11) a été réalisée, établissant ainsi une nouvelle référence documentaire pour l'œuvre. Cette première phase de numérisation a duré 91 minutes.

Pour la seconde série, des ajustements du système ont été nécessaires et ont été faites dans la nuit. La caméra a été positionnée à 60 cm de l'œuvre (voir Figure 50) pour une capture précise des détails du visage. L'impossibilité de déplacer l'éclairage ou de synchroniser automatiquement celui-ci, en raison de dépassements des tolérances géométriques permises par l'algorithme, a conduit à une synchronisation manuelle. Cette adaptation a permis la réalisation de quatre photographies supplémentaires, utilisant des filtres centrés sur les longueurs d'onde de 560, 800, et 900 nm, ainsi qu'une prise sans filtre. Chaque image a été capturée avec deux réglages de mise au point afin de compenser une profondeur de champ réduite, complexifiant ainsi l'obtention d'une netteté optimale. Cette seconde numérisation a duré 34 minutes (voir Tableau 4).

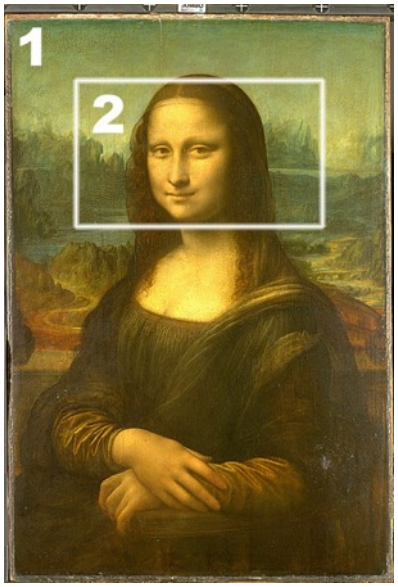


*Figure 49 - (←)* La Joconde*, image totale (1) - Aire de la macrophotographie (2)* @ P. Cotte

*Figure 50 - (→) La caméra multispectrale à 60 cm de* La Joconde *pour la macrophotographie* @ P. Cotte

| | Global: | Macro: |
|---|---|---|
| Resolution (dpi): | 372 | 1523 |
| Resolution (pixel per mm²): | 216 | 3627 |
| Pixel size of image (µm): | 68 | 16.7 |
| Definition (Mpixel): | 137 | 240 |
| Scan area l x h (mm): | 779 x 818.67 | 333 x 200 |

*Tableau 4 - Spécifications techniques deux acquisitions*

### 2.8.5 Traitements des données d'acquisition

Le résultat de la numérisation consiste en un ensemble de 13 images multispectrales, permettant une analyse précise de la réflexion diffuse de la lumière sur chaque pixel.

**Reconstitution des couleurs**

Une fois les données multispectrales corrigées et normalisées, il devient nécessaire de reconstituer les couleurs. Les données permettent la simulation de l'éclairage du tableau sous différents illuminants (lumière du soleil, bougie, lampe halogène, etc.) Il a été choisi la norme CIE D65 de la lumière du jour artificielle. Suivant le modèle de reconstruction expliqué au § 6.6, page-sup. - 51 -.

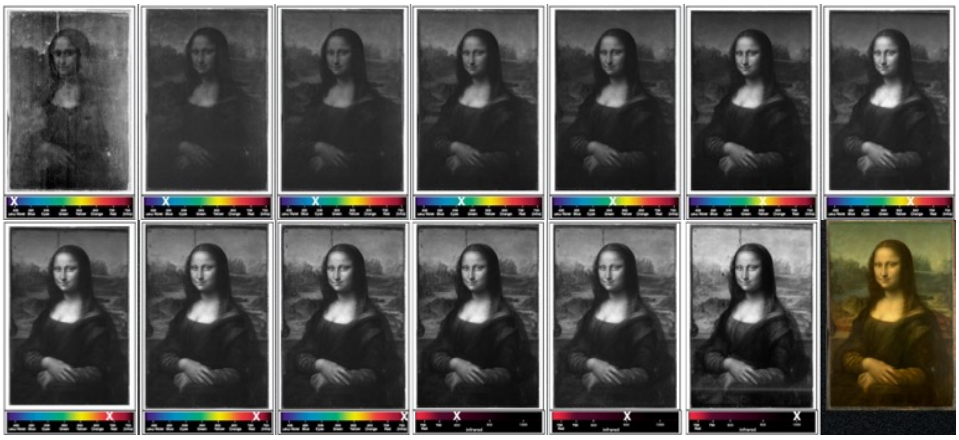


*Figure 51 - Les 13 images multispectrales et la reconstruction couleur pour un illuminant D65* @ P. Cotte

**La fausse couleur infrarouge**

La technique de la fausse couleur infrarouge a déjà été présentée au § 1.3.2 page 18. Dans le cas de la Joconde, l'image réalisée par le laboratoire a été obtenue en combinant une photographie numérique RGB avec une image infrarouge.

En revanche, la fausse couleur que nous appliquons dans le cadre de l'imagerie multispectrale repose sur un algorithme spécifique utilisant les filtres couvrant le domaine 520-1000 nm, dont trois relèvent du proche infrarouge. Leur intégration au calcul revient à les traiter comme visibles, ce qui produit une image fortement colorée, permettant de mettre en évidence la structure des couches picturales ainsi que certaines restaurations, reprises et repentirs. Une augmentation de la saturation des couleurs permet mettre en évidence certaines structures superficielles.

*Figure 52* - La Joconde - *Image couleur D65 (←) et Fausse couleur infrarouge (→)* © P. Cotte

Pour résumer, la numérisation multispectrale de *La Joconde* a permis de générer un ensemble de données d'une grande richesse, offrant une vision multispectrale inédite de l'œuvre. Ces images vont permettre de mieux comprendre les techniques et les matériaux utilisés par Léonard de Vinci, mais également de contribuer à la préservation et à l'étude approfondie de ce chef-d'œuvre emblématique.

## Conclusion

Le système présenté dans ce chapitre constitue une réponse instrumentale à des exigences jusqu'alors non satisfaites dans le domaine de l'imagerie scientifique du patrimoine. Conçu à une époque où aucune solution commerciale ne permettait d'allier haute définition, fidélité spectrale, stabilité géométrique et rigueur métrologique, ce dispositif multispectral s'est imposé comme une avancée significative, tant sur le plan technologique que méthodologique.

Sa conception a été guidée par un cahier des charges rigoureux : architecture opto-mécanique intégrée, filtres interférentiels à bandes étroites régulièrement réparties couvrant le visible et le proche infrarouge, éclairage collimaté, calibré et thermiquement stabilisé, protocoles de calibration et de correction avancés. La qualité des données produites - en termes de résolution spatiale, de dynamique d'image, de précision spectrale et de stabilité temporelle - a permis de dépasser les limites inhérentes aux systèmes RGB traditionnels et de répondre aux besoins spécifiques de l'analyse matérielle des œuvres d'art.

L'état de l'art postérieur a montré que cette architecture a non seulement anticipé les tendances majeures de l'imagerie multispectrale patrimoniale, mais en a souvent constitué un point de départ. De nombreuses recherches ont prolongé ou adapté ces principes, que ce soit sous forme de dispositifs miniaturisés, de filtres alternatifs, d'éclairages LED à bande étroite, ou encore dans des domaines d'application comme la colorimétrie avancée, la lecture de palimpsestes ou les approches multispectrales en RTI.

L'exemple de la numérisation intégrale de *La Joconde*, présentée en dernière partie de ce chapitre, illustre la maturité atteinte par ce système. Elle témoigne de sa capacité à produire une documentation métrologique de très haute qualité, y compris dans des contextes aussi exigeants que celui du musée du Louvre. Ce cas emblématique démontre que cette chaîne instrumentale permet d'ouvrir de nouveaux champs d'analyse, en révélant des structures invisibles à l'œil nu et en préparant les conditions d'une lecture approfondie des strates picturales.

Dans cette perspective, le chapitre suivant présentera la méthode analytique développée à partir de ces images : la méthode L.A.M., une technique optique et algorithmique conçue pour amplifier, extraire et interpréter les micro-traces picturales invisibles dans une démarche à la fois expérimentale, herméneutique et épistémologique ouvrant la voie à une lecture approfondie des couches picturales et des gestes techniques de Léonard de Vinci.

# CHAPITRE 3

## La méthode L.A.M. : formulation, validation et révélations sur *La Joconde*

« *Philosophia in hoc libro naturae scripta est lingua mathematica*. »

Galilée, *Il Saggiatore,* 1623
*(« La philosophie [= la science] est écrite dans ce livre de la nature en langage mathématique. »)*

# 3 CHAPITRE 3 - La méthode L.A.M. : formulation et validation sur *La Joconde*

La méthode L.A.M. (*Layer Amplification Method*) désigne une méthode de traitement des images multispectrales ; par extension, le terme imagerie L.A.M. s'applique aux images obtenues grâce à ce procédé. Elle s'appuie sur les signaux multispectraux acquises par le dispositif présenté au chapitre précédent et ne relève pas seulement d'une innovation algorithmique : elle introduit également une inflexion plus large dans la manière d'aborder la matérialité des œuvres. Avant d'en présenter les principes et les applications, il convient d'en préciser le positionnement épistémologique.

## Vers une inflexion épistémologique dans l'étude des œuvres peintes

L'histoire des sciences du patrimoine est ponctuée de mutations qui ne tiennent pas uniquement à l'apparition de nouvelles techniques, mais à la transformation des conditions d'intelligibilité de l'objet étudié. L'introduction de la radiographie X dans l'analyse des peintures, au début du XXe siècle, a constitué l'une de ces inflexions décisives. En permettant de visualiser ce qui, jusqu'alors, échappait au regard - repentirs, dessins sous-jacents, structures internes -, elle a déplacé le statut même de l'image peinte : de surface visible, elle devenait trace stratifiée, palimpseste interprétable, matérialité en épaisseur. L'œuvre cessait d'être un pur résultat pour redevenir un processus, une construction.

La méthode L.A.M., bien que contemporaine et fondée sur d'autres principes opératoires, pourrait engager une évolution d'ordre comparable - non par analogie instrumentale, mais par affinité de conséquence épistémologique. Elle ne donne pas simplement à voir ce qui est sous la surface, mais reconfigure les modalités de visibilité elles-mêmes. En procédant par neutralisation des invariants spectraux pour faire émerger les écarts faibles, elle n'offre pas une image additive, mais une image différentielle : ce n'est pas ce qui est là qui est montré, mais ce qui ne devrait pas y être selon le modèle spectral attendu.

En ce sens, la méthode L.A.M. ne renouvelle pas seulement la visualisation des œuvres, elle interroge leur lisibilité. Elle fait apparaître comme significatif ce qui, dans d'autres régimes de vision, passerait pour du bruit ou de l'artefact. Elle introduit une nouvelle articulation entre modèle, mesure et interprétation. Ce que la radiographie avait inauguré - la possibilité d'objectiver les repentirs et les étapes d'exécution - se prolonge ici par une possibilité nouvelle : celle de détecter l'écart dans la cohérence même de la couche picturale, et de l'ériger en indice historiographique.

Cette dynamique, si elle venait à s'inscrire durablement dans les pratiques de recherche, pourrait constituer une inflexion épistémologique : non dans la substitution d'un outil à un autre, mais dans l'évolution des règles du visible, des formes de preuve, et des modalités de problématisation appliquées aux œuvres peintes.

## Introduction

Bien que les modèles théoriques fournissent des bases solides pour comprendre les interactions lumière/matière, leur application repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Le chapitre suivant ne développera pas ces modèles, il s'attachera à analyser expérimentalement les conditions d'efficacité de la méthode L.A.M., notamment l'influence de l'éclairage et des performances instrumentales. Dans la réalité, les couches picturales sont beaucoup plus complexes et incluent des éléments tels que :

- Le nombre de strates et la nature de chaque couche (peinture, sous-couche, vernis),

- Les propriétés optiques des matériaux comme les pigments, leurs caractéristiques d'absorption, de diffusion, ainsi que leurs tailles et leurs indices de réfraction,
- Le liant, qui influence la manière dont la lumière est transmise et diffusée à travers les couches, et son taux de dilution qui affecte la densité des pigments
- La présence de vernis, modifiant les réflexions de surface et la transmission de la lumière,
- Les effets du vieillissement, qui peuvent altérer la structure microscopique, les indices de réfraction, et les propriétés optiques des couches au fil du temps.

Cependant, ce niveau de précision est difficile à atteindre dans la réalité, en particulier pour des œuvres d'art anciennes ou complexes. Une œuvre de peinture n'est pas homogène : sa composition varie de manière significative sur chaque millimètre carré. Ce qui est vrai à un endroit précis, et qui pourrait être analysé en détail avec un prélèvement au microscope électronique par exemple (voir Figure 91), peut s'avérer complètement différent à seulement quelques millimètres de distance. Chaque millimètre d'une peinture est souvent le résultat d'une recette unique, avec une superposition de strates, de pigments, et de liants qui diffère de son voisin. Ainsi, si les modèles théoriques peuvent être utiles pour des cas simples et faire des simulations (Pottier et al., 2018) avec des aplats de couleurs uniformes, ils atteignent rapidement leurs limites lorsqu'il s'agit de peintures complexes où la composition varie continuellement.

Dans ce contexte, pour retrouver les éléments graphiques dissimulés sous la surface de la peinture, il devient essentiel de s'appuyer sur des méthodes capables de tirer parti des interactions complexes entre la lumière et la matière picturale. C'est précisément ce que propose la méthode L.A.M. : en amplifiant des variations infimes du signal multispectral, elle met en évidence des informations invisibles à l'œil nu, révélant ainsi des structures sous-jacentes à travers des couches hétérogènes et des compositions complexes, même lorsque la composition exacte des couches varie localement et demeure inconnue. Sans nécessiter une connaissance préalable des propriétés optiques des matériaux, de la stratigraphie ou des effets du vieillissement, la méthode L.A.M. exploite directement la réponse lumineuse mesurée et offre une capacité d'analyse fine et adaptable à la diversité des œuvres d'art.

## 3.1 Les traitements d'images et les images L.A.M.

### 3.1.1 Techniques traditionnelles de traitements d'images multispectrales - état de l'art

La véritable valeur de l'imagerie multispectrale réside dans les traitements numériques qui permettent d'extraire des informations pertinentes à partir de ces vastes ensembles de données. L'état de l'art en matière de traitements numériques pour l'extraction d'informations dans ce domaine a considérablement évolué, notamment grâce à l'intégration de méthodes issues du traitement d'image classique, de l'apprentissage automatique, et plus récemment, du *deep learning*.

Les étapes de traitement des images multispectrales ou hyperspectrales commencent généralement par des prétraitements puis l'extraction de caractéristiques et l'interprétation des résultats.

**Prétraitement des images multispectrales**
Le prétraitement constitue une étape indispensable pour optimiser la qualité des données et faciliter l'extraction d'informations pertinentes. Diverses techniques classiques sont mises en œuvre pour corriger les distorsions optiques, normaliser les images et atténuer le bruit. Dans le cas des caméras à faible résolution, nécessitant des acquisitions par bandes (notamment les caméras hyperspectrales) ou par petites zones (telles que les caméras infrarouges), des méthodes d'assemblage d'images (*stitching*) (Brown et Lowe, 2007; Szeliski, 2007) sont employées afin de reconstituer une image cohérente à partir de multiples captures. Par ailleurs, les corrections radiométriques et géométriques

sont indispensables pour calibrer les images, les rendant ainsi exploitables dans le cadre d'analyses comparatives ou quantitatives. Des techniques avancées de réduction du bruit, telles que les filtres de Wiener (Gonzalez, 2019) ou les transformations par ondelettes (Mallat, 2008), sont fréquemment utilisées pour améliorer la qualité des images tout en préservant un maximum d'informations. Enfin, des méthodes de registration (Zitová et Flusser, 2003) sont appliquées afin de superposer avec précision les images acquises à différentes longueurs d'onde.

**Extraction des caractéristiques et interprétation des données**

L'extraction des caractéristiques constitue le cœur des traitements numériques en imagerie multispectrale. Parmi les techniques les plus couramment utilisées, on trouve :

Analyse de composants principaux (PCA) : La PCA est une méthode classique (Jolliffe, 2002) pour réduire la dimensionnalité des ensembles de données multispectrales ou hyperspectrales (Delaney, Dooley, et al., 2017) tout en conservant les informations les plus importantes. Elle permet de compresser les données tout en maximisant la variance, facilitant ainsi la détection de caractéristiques subtiles ou cachées dans les œuvres d'art, par exemple.

Méthodes de détection d'anomalies : Ces méthodes, comme la *Robust Principal Component Analysis* (RPCA), sont utilisées pour identifier des signatures spectrales qui dévient du comportement attendu, ce qui est particulièrement utile pour détecter des altérations ou des repeints sur des œuvres d'art (Candès et al., 2011).

Segmentation spectrale : La segmentation consiste à diviser l'image en régions homogènes sur la base de la signature spectrale des différents matériaux (Ghamisi et al., 2017). Des algorithmes comme le *k-means*, la segmentation par graphes ou encore les méthodes basées sur les modèles gaussiens (GMM) sont utilisées pour distinguer les différentes zones d'intérêt.

Méthodes par *clustering* non supervisé : Ces algorithmes permettent de classer les pixels en fonction de leur signature spectrale. Des techniques comme DBSCAN ou *Mean Shift* (Comaniciu et Meer, 2002) ont montré leur efficacité dans l'extraction automatique d'informations multicouches.

Spectral Angle Mapping (S.A.M.) : S.A.M. est une technique de classification basée sur l'angle entre les signatures spectrales des pixels de l'image (de Carvalho Júnior et Meneses, 2000; O'Sullivan, Hoy et Rutt, 2011). Elle permet de quantifier la similarité entre les spectres, facilitant ainsi l'identification et la classification des matériaux en fonction de leurs caractéristiques spectrales spécifiques, indépendamment des variations d'éclairage.

Réseaux de neurones convolutionnels (CNNs) : Les CNNs permettent d'extraire automatiquement des caractéristiques complexes directement à partir des images multispectrales, offrant une approche puissante pour la classification et la segmentation (Chen et al., 2016).

Support Vector Machines (SVM) : Les SVM sont couramment utilisés pour classifier les données multispectrales après réduction de la dimensionnalité, en offrant une méthode puissante pour la classification supervisée (Camps-Valls et al., 2006).

**Défis actuels et perspectives**

Malgré les avancées importantes, l'extraction d'informations à partir d'images multispectrales présente encore des défis. L'un des principaux enjeux réside dans la gestion de la très grande quantité de données générées par l'imagerie hyperspectrale, ce qui nécessite des méthodes de traitement et d'analyse efficaces en termes de temps de calcul et de capacité de stockage.

**Absences de traitements d'images spécifiques pour l'extraction de dessin**

Il convient de noter que la majorité des articles portant sur les traitements d'images multispectrales ou hyperspectrales utilisent ces approches pour l'identification des pigments avec des traitements de type SAM, PCA et NDI (Fragasso and Masini, 2011). Bien que les différentes méthodes de traitement d'images puissent être appliquées de manière indifférenciée aux images issues du domaine visible ou de l'infrarouge (NIR, SWIR), il faut souligner qu'aucune étude ne se concentre spécifiquement sur le domaine visible pour l'extraction de dessins préparatoires ou d'autres informations similaires. La plupart des recherches partent du postulat que seules les longueurs d'onde infrarouges offrent une capacité de diffusion suffisante pour traverser les couches picturales et révéler des éléments sous-jacents. Certaines études (Daffara and Fontana, 2011, p. 693) explorent l'extraction d'informations infrarouges par des techniques de soustraction d'images IR, tandis que d'autres (Delaney, Trumpy, et al., 2017, p. 9) utilisent un calcul basé sur le rapport $K/S$ pour améliorer la lisibilité et le contraste des images IR, une proposition pour séparer deux strates d'une couche picturale afin d'amélioration le contraste.

Parallèlement, certains travaux (Bacci et al., 2005) utilisent PCA, qui traite l'ensemble des longueurs d'onde, y compris celles du domaine visible. Cependant, même dans ce contexte, le domaine visible n'est pas spécifiquement étudié ou isolé pour l'analyse des dessins préparatoires, renforçant ainsi l'idée que l'infrarouge demeure la référence pour l'exploration des couches sous-jacentes des peintures. À ce jour, aucune découverte de dessins préparatoires n'a été signalée en utilisant exclusivement l'analyse du domaine visible avec des caméras multispectrales ou hyperspectrales.
La méthode L.A.M. est une méthode complémentaire à l'étude des images scientifiques traditionnelles infrarouges. C'est une méthode de traitement des images numérisées avec la caméra multispectrale et le dispositif d'éclairage spécifique expliqués dans cette thèse et qui vise à amplifier les signaux faibles des couches internes de la peinture perçus dans les données numériques. Cette méthode se concentre sur les moyens de révéler des informations cachées, telles que les dessins préparatoires, *spolvero*, carroyage, lignes de construction ou de perspective, reprises, repentirs, traces digitales, coups de brosse, traces de grattages, signatures effacées, etc.

### 3.1.2 Principes de la méthode L.A.M.

La méthode L.A.M. a pour objectif de tirer parti des propriétés de diffusion de la lumière à travers les différentes couches picturales afin de révéler des informations structurelles ou compositionnelles souvent dissimulées sous la surface visible de l'œuvre. Bien qu'elle s'inspire de modèles issus de l'optique physique, son fonctionnement ne repose pas exclusivement sur une modélisation théorique prédéfinie, mais privilégie une exploitation expérimentale des données spectrales.

Comme illustré en Figure 53, la lumière incidente - supposée blanche - est analysée par plages spectrales discrètes, généralement comprises entre 400 nm et 1000 nm. Chaque longueur d'onde possède une capacité de pénétration (diffusion) variable : les plus courtes (400 nm, violet) sont principalement absorbées ou diffusées dans les premiers microns de la couche de vernis, tandis que les plus longues jusqu'à 1000 nm traversent davantage les couches picturales, atteignant parfois les couches préparatoires ou les repentirs.

Cette stratification optique permet, en principe, d'isoler certaines informations caractéristiques de profondeurs différenciées. Par exemple, la soustraction numérique de l'image obtenue à 400 nm de celle obtenue à 440 nm peut atténuer les informations superficielles, révélant des détails sous-jacents.

Toutefois, cette relation entre longueur d'onde et profondeur n'est ni linéaire ni même monotone : elle est altérée par les propriétés de diffusion interne, elles-mêmes dépendantes de la taille, de la concentration et de la nature optique des grains de pigments. Dans de telles conditions, la pénétration de la lumière ne peut plus être considérée comme strictement proportionnelle à la longueur d'onde, rendant plus complexe l'estimation relative de la profondeur d'apparition des informations.

La méthode L.A.M. exploite donc ces phénomènes de diffusion et d'absorption à travers un traitement numérique fondé sur des combinaisons d'images acquises à différentes longueurs d'onde. Elle permet, par différentiation et amplification contrôlée, de faire émerger des variations spectrales ténues, parfois invisibles dans les images d'origine. Néanmoins, en raison de la complexité des interactions lumière-matière dans un système pictural stratifié, il demeure difficile de localiser avec certitude la profondeur exacte d'une information révélée par ce procédé.

La méthode L.A.M. repose sur deux modes principaux de calcul appliqués aux signaux de réflectance :

• la soustraction pondérée de réflectances, notée $L.A.M._{sub}$, qui consiste à comparer directement deux images spectrales après calage par un facteur proportionnel de correction $p_{cor}$;

• la dérivation numérique résiduelle des réflectances, notée $L.A.M._{res}$, qui évalue l'écart entre une mesure et sa valeur interpolée à partir des longueurs d'onde voisines.

Ces deux approches appartiennent à une même logique différentielle : $L.A.M._{sub}$ s'appuie sur la comparaison directe entre deux bandes spectrales, tandis que $L.A.M._{res}$ exploite la continuité spectrale pour isoler les résidus. Elles constituent les deux variantes de la méthode L.A.M., utilisées alternativement selon la nature des données et le type d'informations recherchées. Elles ont pour objectif commun d'extraire les informations sous-jacentes des couches picturales tout en s'affranchissant, autant que possible, des nombreuses variables optiques et physiques influençant la propagation de la lumière. L'algorithme développé se veut généraliste : il peut s'adapter à diverses configurations et offrir une utilisation rapide et efficace, indépendamment des spécificités matérielles ou techniques de l'œuvre analysée.

Le facteur $p_{cor}$ est un scalaire introduit comme **coefficient proportionnel de correction** (*proportional correction factor*). Il constitue un facteur multiplicatif appliqué à l'une des deux réflectances afin de neutraliser, dans le calcul différentiel spectral, les zones optiquement homogènes. La lettre $p$ renvoie à la notion de proportion (*proportionality*), plutôt qu'à une intensité physique : il exprime la mise à l'échelle relative nécessaire pour comparer deux longueurs d'onde de manière cohérente dans le cadre de l'analyse L.A.M.

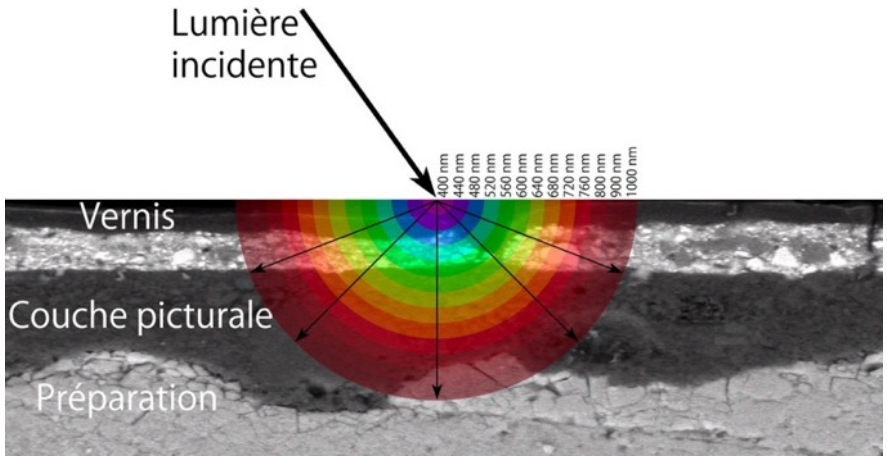
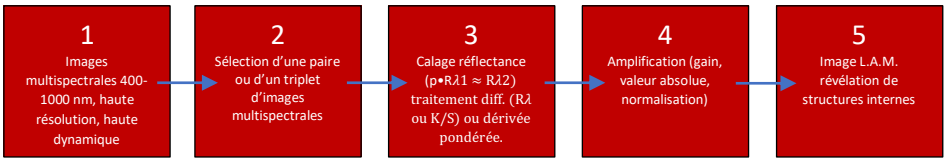



*Figure 53 - Représentation schématique de la diffusion d'une lumière incidente dans une couche picturale, la réalité est bien plus complexe en fonction de la matière picturale.*

**Schéma de la méthode L.A.M.**

Ce schéma présente les principales étapes de la méthode, depuis l'acquisition multispectrale jusqu'à la génération finale de l'image, en passant par le calage de la réflectance, le traitement différentiel spectral et l'amplification contrôlée.




**1. Acquisition multispectrale (400–1000 nm).**

Une série d'images est enregistrée à travers des filtres étroits couvrant le visible et le proche I.R.

**2. Sélection d'une paire ou d'un triplet d'images ($R_\lambda$).**

Deux (ou trois) longueurs d'onde sont retenues parmi l'ensemble des acquisitions.

**3. Calage de la réflectance et traitement différentiel ($p_{cor} \cdot R_{\lambda_1} \approx R_{\lambda_2}$).**

Le calage met en évidence une différence entre les deux réflectances à deux longueurs d'onde différentes en corrigeant l'une d'elles par le scalaire $p_{cor}$. Une opération de soustraction ou de dérivée pondérée est appliquée sur toute l'image, soit sur $R_\lambda$, soit sur les $K/S$ et vise à neutraliser les écarts d'intensité globaux afin d'établir une quasi-égalité radiométrique préalable au calcul et à isoler les variations locales pertinentes pour la détection et la mise en évidence des structures internes.

Les 13 réflectances génèrent 1066 images : les combinaisons deux à deux donnent $\binom{13}{2} = 78$ couples, chacun traité dans les deux directions $(R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2})$ et $(R_{\lambda_2} - R_{\lambda_1})$ et pour un ensemble de valeurs du facteur de $p_{cor}$ (voir page 71) soit 780 images. Les combinaisons trois à trois, au nombre de $\binom{13}{3} = 286$, ajoutent 286 images.

**4. Amplification contrôlée.**

Le signal différentiel spectral est amplifié par un gain et re-mappé dans la plage dynamique de sortie (valeur absolue, normalisation).

**5. Génération des image L.A.M.**

Le résultat est une image contrastée mettant en évidence des tracés ou structures sous-jacentes.

**Détournement de la régression linéaire en méthode de révélation du signal faible**

Cette démarche peut être **directement rapprochée de la théorie du signal** : dans un système physique, un signal utile est souvent défini non par son intensité absolue, mais par sa capacité à rompre la prédictibilité d'un modèle. De même, dans une image multispectrale, la majeure partie de l'information est constituée de variations continues et corrélées entre les longueurs d'onde, issues des couches visibles de l'œuvre. Ce spectre moyen constitue une forme de signal structurel ou de comportement régulier du système, qui masque les micro-variations liées à des éléments enfouis.

La méthode L.A.M. applique un filtrage spectral différentiel qui élimine les composantes communes entre deux réflectances, assimilables à un fond stable, et met en évidence les écarts résiduels qui trahissent des différences locales de structure.

La méthode L.A.M. ne se limite donc pas à révéler « ce qui est caché », mais met en évidence **ce qui ne devrait pas être là** selon le modèle attendu. Elle détecte les perturbations radiométriques locales qui échappent à la corrélation entre bandes spectrales voisines. L'image obtenue n'est pas une représentation directe de la peinture, mais une image différentielle spectrale, fondée sur les relations entre couches et longueurs d'onde, offrant une lecture analytique de la matérialité picturale et de son évolution.

La formulation mathématique retenue est la suivante :

$$D(t) = S_1(t) - p_{cor}\, S_2(t) \qquad \textit{Eq. ( 5 )}$$

$$p^{\star}_{cor} = arg\, \min_{p_{cor}} \int_{\mathcal{T}} \left(S_1(t) - p_{cor}\, S_2(t)\right)^2 dt \qquad \textit{Eq. ( 6 )}$$

où $p^{\star}_{cor}$ désigne la valeur optimale du scalaire $p_{cor}$, facteur proportionnel de correction, c'est-à-dire celle qui minimise l'erreur quadratique entre les deux signaux $S_1(t)$ et $S_2(t)$.

Cette écriture correspond formellement à une **régression linéaire sans terme constant**, dont le coefficient $p_{cor}$ ajuste au mieux les deux signaux. Dans le cadre de la méthode L.A.M., ce coefficient n'est pas une fin en soi : il sert à annuler les composantes dominantes communes aux deux acquisitions. L'information d'intérêt se situe dans le résiduel $D(t)$, c'est-à-dire dans ce qui échappe à la colinéarité entre les deux signaux.

La spécificité de la méthode L.A.M. réside alors dans l'amplification de ce résiduel. La régression ne vise donc plus à améliorer la représentation d'un signal, mais à exploiter la projection orthogonale, c'est-à-dire la décorrélation linéaire des signaux, comme un levier de contraste. Ainsi, l'opération élémentaire de régression change de paradigme : elle ne sert plus à modéliser, mais à mettre en évidence ce qui, sans ce procédé, resterait invisible.

### 3.1.3 Les calculs $L.A.M.$

#### 1- Les calculs $L.A.M._{sub}$ de soustraction et différences d'images avec facteurs correctifs

La méthode L.A.M. s'appuie sur différents choix de signaux :

- La réflectance diffuse $R(\lambda)$, signal de base mesuré par la caméra ;
- Le rapport $\frac{K}{S}$, définit par la fonction de Kubelka-Munk (Eq. ( 7 )), constitue une transformation croissante de la réflectance dans son domaine usuel de validité. Plus sensible que $R$ aux faibles valeurs de réflectance, et donc mieux adapté à la détection de variations ténues dans les zones sombres ;
- La dérivée spectrale $\frac{dR}{d\lambda}$, ou $\frac{d(K/S)}{d\lambda}$, distinct d'une simple différence de réflectances, permet souvent de mieux révéler des transitions spectrales rapides ou des chevauchements de bandes.

Dans tous les cas, les calculs $L.A.M._{sub}$ introduisent un facteur de proportionnalité correctif $p_{cor}$, qui ajuste localement les signaux afin de neutraliser les zones spectralement homogènes et de stabiliser le fond différentiel. Ce cadre général structure ensuite les différentes opérations décrites ci-dessous.

Soustraction de réflectances spectrales avec facteurs correctifs

Comme nous le verrons (voir Figure 76 page 90), une simple soustraction d'images conduit à des résultats sombres qui, même après éclaircissement ou amplification, apportent peu ou pas d'informations nouvelles. En revanche, l'application préalable d'un facteur de proportionnalité correctif $p_{cor}$ à l'une des images permet d'obtenir une image beaucoup plus riche et informative. Se pose alors la question essentielle : comment déterminer la ou les valeurs optimales $p^{\star}_{cor}$ ?

La ou les valeurs optimales $p^{\star}_{cor}$ ne pouvant être déterminées à priori, la méthode $L.A.M._{sub}$ adopte une stratégie de recherche paramétrique : elle explore systématiquement les treize filtres, par groupes de deux longueurs d'onde, et teste pour chacune plusieurs valeurs du facteur $p_{cor}$.

L'expérience menée sur une grande variété de peintures montre qu'un premier balayage, fondé sur cinq valeurs de $p_{cor}$ réparties symétriquement autour de la valeur de référence (±20% et ±10%), permet de révéler des détails cachés, comme des tracés préparatoires, avec une efficacité supérieure à celle des images infrarouges seules. Lorsque certaines combinaisons apparaissent particulièrement prometteuses, un second passage affine les résultats en utilisant des variations beaucoup plus fines (de l'ordre de 1%, voire de 1 ‰), afin optimiser le contraste et la lisibilité.

Après ce cadre général, détaillons à présent la formulation du signal différentiel basé sur le rapport $\frac{K}{S}$.

Formule du signal différentiel amplifié selon la méthode $L.A.M._{sub}$ basée sur le rapport K/S

Soit deux images spectrales acquises à deux longueurs d'onde voisines $\lambda_1$ et $\lambda_2$, représentées par leurs matrices de réflectance $R_{\lambda_1}(x,y)$, $R_{\lambda_2}(x,y)$. Pour chaque pixel $(x,y)$, on applique la transformation de Kubelka-Munk :

$$\frac{K}{S}(x,y,\lambda) = f_{KM}\big(R(x,y,\lambda)\big) = \frac{\big(1-R(x,y,\lambda)\big)^2}{2R(x,y,\lambda)} \qquad \textit{Eq. ( 7 )}$$

Cette fonction de *remission* relie la réflectance diffuse $R$ au rapport entre le coefficient d'absorption $K$ et le coefficient de rétrodiffusion $S$, en supposant un milieu optiquement épais et diffusant. Elle permet de s'affranchir des effets purement radiométriques de surface et d'accéder à une grandeur plus représentative du comportement interne des matériaux. Il faut noter que le passage de la réflectance $R$ au rapport $K/S$ inverse les contrastes : où $R \uparrow \Rightarrow K/S \downarrow$. L'image résultante est donc inversée pour être comparée avec les images L.A.M. en réflectance.

Le facteur proportionnel de correction $p_{cor}$ est déterminé sur une zone de l'image, de façon à équilibrer les niveaux moyens de $K/S$ entre les deux bandes voisines $\lambda_1$ et $\lambda_2$. Appliqué pixel par pixel, il neutralise les zones optiquement cohérentes pour que le signal différentiel tende vers zéro. On définit alors l'image L.A.M. comme :

$$L.A.M._{sub} \;=\; L(x,y) = A \cdot \left( p_{cor} \cdot \frac{K}{S}(x,y,\lambda_1) - \frac{K}{S}(x,y,\lambda_2) \right) \qquad \textit{Eq. ( 8 )}$$

où $A$ représente principalement un gain global. Des opérations complémentaires destinées à améliorer la lisibilité (par ex. normalisation, re-mappage, *stretching*, valeur absolue, etc.) sont détaillées au § 3.1.4 page 74.

• $L(x,y)$ est l'image finale amplifiant les écarts différentiels locaux entre les deux couches spectrales,

• les zones où $p_{cor} \cdot \frac{K}{S}(x,y,\lambda_1) \approx \frac{K}{S}(x,y,\lambda_2)$ s'annulent ou tendent vers zéro (signal « silencieux »),

• les zones où $p_{cor} \cdot \frac{K}{S}(x,y,\lambda_1) \neq \frac{K}{S}(x,y,\lambda_2)$ apparaissent comme actives dans l'image $L.A.M._{sub}$

Remarques:

• Cette version repose sur une interprétation physico-optique plus complète que la simple différence de réflectances, puisqu'elle considère directement le rapport $K/S$, lié au comportement interne du milieu pigmentaire.

• Le rapport $K/S$ est particulièrement sensible aux variations d'absorption et permet de discriminer des différences ténues, notamment lorsque des motifs sont enfouis sous de fines couches semi-transparentes.

• Le facteur de correction $p_{cor}$ conserve son rôle d'équilibrage entre les deux bandes, cette fois appliqué dans l'espace $K/S$.

• Afin d'éviter, d'une part, les divisions par des valeurs nulles et, d'autre part, les instabilités apparaissant lorsque la réflectance tend vers l'unité, les paramètres $\varepsilon_{min}$ et $\varepsilon_{max}$ sont introduits lors de la conversion de $R$ en $K/S$. Le résultat dépend toutefois sensiblement du choix de ces deux paramètres.

### 2- Calculs $L.A.M._{res}$, dérivation numérique et amplification différentielle

La dérivée d'un spectre de réflexion diffus constitue un outil puissant pour transformer le signal spectral en un signal différentiel, révélant des caractéristiques structurelles des pigments ou de leurs mélanges. Elle est utilisée dans les calculs $L.A.M._{res}$ pour amplifier des phénomènes locaux du spectre propres aux pigments.

Quelques utilisations de la dérivée, documentées dans la littérature :

• Mise en évidence de transitions rapides : la dérivée souligne les variations brusques du spectre (pics, creux, transitions électroniques, bandes d'absorption), par exemple pour le rouge de mercure ou le rouge de cochenille (Fonseca et al., 2019). Dans le cadre des images $L.A.M._{res}$, cela permet d'amplifier le signal de pigments faibles ou sous-jacents.

• Discrimination de bandes proches : elle améliore la séparation de bandes spectrales larges ou chevauchantes (Pallipurath et al., 2016). On peut également utiliser l'inverse de la tangente de la dérivée (Fazlali et Gorji Kandi, 2020).

• Analyse comparative : comparer les dérivées de spectres de différents pigments ou d'un même pigment sous diverses conditions permet de détecter des variations subtiles (Radpour et al., 2022).

• Quantification des composés : la dérivée peut servir à estimer la concentration relative de composants, car les variations de pente des bandes d'absorption sont souvent proportionnelles à la concentration.

• Étude des interactions pigment-matrice : elle peut révéler des informations sur les interactions avec le liant ou le support, utiles pour comprendre la stabilité et la durabilité des pigments.

Méthodes de dérivation numérique et interpolation linéaire pour les images $L.A.M._{res}$

Dans le cadre de la méthode $L.A.M._{res}$, la dérivée numérique d'un spectre est utilisée non comme une fin en soi, mais pour générer un troisième signal combinant des informations communes avec les deux spectres de départ. L'hypothèse de départ est que le spectre de réflexion diffus d'un pigment blanc est quasi plat dans le visible ; toute variation amplifiée par la dérivée peut alors être interprétée comme la signature d'un pigment coloré ou d'un signal sous-jacent. Cette approche, qui accentue sélectivement les écarts, peut aussi être appliquée à des pigments colorés, moyennant un ajustement des filtres spectraux et des paramètres $p_{cor}$. Pour calculer la dérivée numérique en un point d'un spectre de réflexion diffus à partir des mesures discrètes de la caméra multispectrale, on utilise les méthodes classiques de dérivation numérique. Dans le cas d'une courbe expérimentale, on ne dispose

pas d'une fonction analytique décrivant le spectre : la caméra fournit un ensemble de mesures $(x_i, y_i)$, où $x_i$ correspond à la longueur d'onde du filtre et $y_i$ à la réflectance mesurée.

La dérivation numérique consiste à approcher la valeur de la dérivée en un point $i$ par le taux de variation entre les points voisins. Théoriquement, selon le théorème des accroissements finis, il existe un point de $[x_{i-1}, x_{i+1}]$ où la dérivée est égale à la pente de cette corde reliant $(x_{i-1}, y_{i-1})$ et $(x_{i+1}, y_{i+1})$. Graphiquement, cela revient à remplacer la tangente en $x_i$ par la corde.

La valeur correspondante $y_{corde}$ sert ensuite à calculer **le résiduel exploité par la méthode $L.A.M._{res}$** (voir Figure 54). La tangente (en pointillé) rappelle que cette construction dérive du principe de la dérivée centrée, même si l'opération retenue repose sur une interpolation locale plutôt que sur une dérivation stricte.

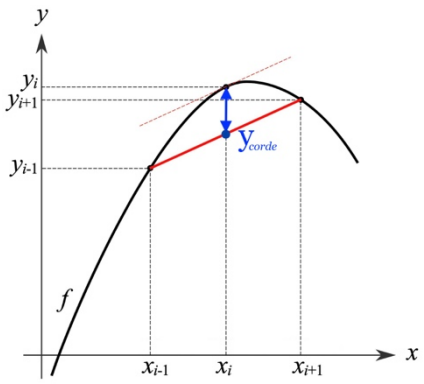



*Figure 54 - Illustration du calcul résiduel appliqué dans la méthode $L.A.M._{res}$*

On définit alors la valeur de la corde en $x_i$ par :

$$y_{corde} = \frac{y_{i-1} + y_{i+1}}{2} \qquad \text{Eq. ( 9 )}$$

Cette simplification repose sur $\Delta x$ constant (filtres espacés de 40 nm). L'intégration dans les images $L.A.M._{res}$ utilise la valeur mesurée $y_i$, le facteur global $A$, et le facteur de correction spectral $p_{cor}$ permettant d'amplifier le signal et de générer des séquences d'images en faisant varier sa valeur.

$$L.A.M._{res} = A \cdot (p_{cor}\, y_i - y_{corde}) \qquad \text{Eq. ( 10 )}$$

Ce calcul n'est pas appliqué aux filtres aux limites, à 400 nm et 1000 nm.

**Deux modes d'analyse des nombreuses images L.A.M.**

La méthode L.A.M., quel que soit le type de calcul employé $L.A.M._{res}$ ou $L.A.M._{sub}$ conduit à la production de plusieurs images avec les différentes valeurs de $p_{cor}$. Deux modes d'analyse complémentaires sont alors possibles. Le premier consiste à examiner ces images fixes, comme dans les approches scientifiques classiques, mais en disposant cette fois d'un nombre particulièrement élevé de variantes. Le second mode, plus original, repose sur la visualisation de ces images en séquence rapide, comparable à une vidéo. Ce mode exploite la capacité de l'œil humain à détecter instantanément de faibles différences d'une image à l'autre - une tâche beaucoup plus difficile lorsqu'elles sont simplement comparées côte à côte. La présentation séquentielle devient ainsi un outil puissant pour repérer et interpréter des écarts visuels subtils dans les couches picturales.

**Ouverture sur la question des strates picturales**

Deux exemples montrés ci-après - le visage et les mains de *La Joconde* - voir Figure 67 page 82 et Figure 68 page 83 - montrent que la variation progressive du facteur $p_{cor}$ peut faire émerger des informations invisibles dans les images unitaires. Dans ces cas, un tracé sous-jacent apparaît de façon stable, suggérant une pénétration progressive de la lumière dans la couche picturale. Mais d'autres observations, présentées au chapitre 5 (par exemple les draperies du ciel Figure 143 page 167), révèlent des situations plus complexes où des détails distincts, voire contradictoires, apparaissent successivement, comme si plusieurs niveaux de dessin se superposaient.

Il est important de souligner que la méthode L.A.M. ne fournit pas une mesure directe de profondeur, l'apparition séquentielle de détails peut résulter de différences locales de composition pigmentaire, d'épaisseur de couches, ou encore de phénomènes de diffusion. Parler de « strates » constitue donc une métaphore opératoire, utile pour décrire la succession d'informations révélées, mais qui ne doit pas être comprise comme une stratigraphie physique stricte.

Cette réserve posée, l'expérience montre que la méthode L.A.M. ne met pas seulement en évidence une image cachée unique, mais peut révéler une pluralité de niveaux d'information, enrichissant ainsi la lecture des processus créatifs et des repentirs.

### 3.1.4 Amplifier les images L.A.M.

Après ces calculs, les images L.A.M. sont sombres et peu exploitables, les calculs mettent en évidences des informations très ténues. Et les valeurs de niveaux de gris sont souvent de l'ordre de 0 à 300 niveaux sur 65 535 niveaux de gris comme on peut le voir sur l'histogramme (voir Figure 55). Il est donc nécessaire d'appliquer une série de traitements pour amplifier les signaux très faibles détectés par les algorithmes. Cela souligne la nécessité d'obtenir, à la source par la caméra, des images de haute qualité, avec une large plage dynamique, afin d'éviter d'amplifier uniquement le bruit électronique des images. Quatre traitements de base sont appliqués sur les images L.A.M. brutes : Le *binning*, l'étirement (*stretching*) ou la normalisation (*Normalization*), et l'égalisation d'histogramme.

***Binning***

Pour améliorer notablement la qualité des images au niveau du bruit la méthode du *binning* est efficace pour améliorer le SNR. (voir § 6.1.1 page-sup. - 5 -). Selon les conditions d'acquisition et l'intensité du signal, elle peut être appliquée à différents stades du traitement. L'histogramme d'une image montre, pour chaque niveau de gris, le nombre de pixels possédant cette valeur. Il permet ainsi de visualiser la répartition des intensités dans l'image et d'en déduire des informations globales, comme la luminosité moyenne et le contraste (voir Figure 55).

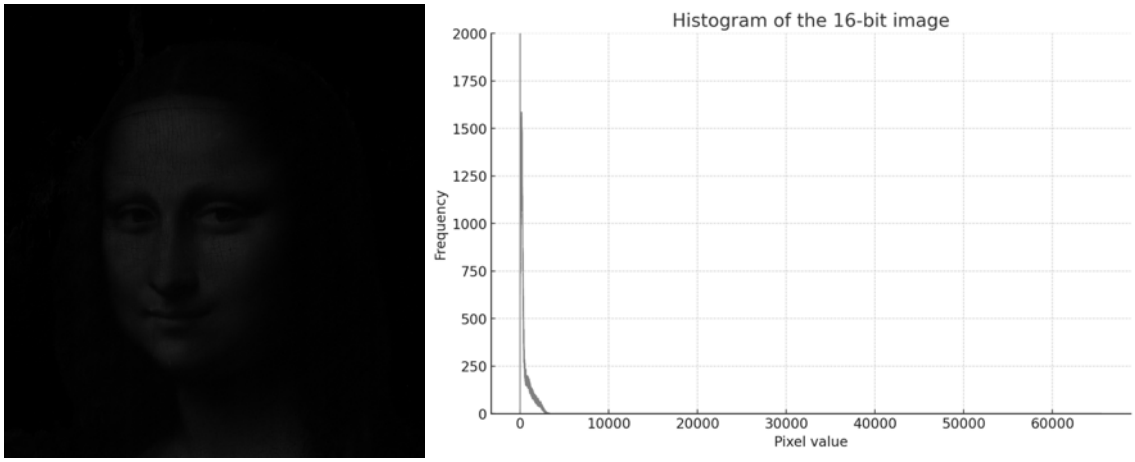



*Figure 55 - Exemple d'image L.A.M. très sombre, en sortie de calculs et son histogramme*

**Étirement de l'Histogramme (*Stretching*)**

Objectif : Améliorer le contraste d'une image en étendant la plage des niveaux de gris présents dans l'image.

Processus : Détermination des valeurs minimales et maximales :
$I_{min}$ : La plus petite valeur de niveau de gris dans l'image.
$I_{max}$ : La plus grande valeur de niveau de gris dans l'image.

Calcul des nouvelles valeurs de niveau de gris :

$$I'_{stretched}(x,y) = \frac{I(x,y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \times 65535 \qquad \text{Eq. ( 11 )}$$

avec 0 et 65535 correspondant respectivement aux valeurs minimale et maximale de la plage de sortie (pour une image 16 bits).

**Normalisation (*Normalization*)**

Objectif : Ajuster les valeurs de l'image pour qu'elles s'inscrivent dans une plage spécifique et comparable à d'autres images.

Processus : Calcul des nouvelles valeurs de niveau de gris :

$$I_{norm} = \alpha \frac{I(x,y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} + \beta \qquad \text{Eq. ( 12 )}$$

où les coefficients $\alpha$ et $\beta$ permettent de fixer la dynamique et le niveau moyen de l'image. Par exemple, avec $\alpha = 50000$, $\beta = 2000$, les niveaux de gris sont ajustés dans la plage [2000 ; 52000] au lieu de [0 ; 65535], ce qui préserve une réserve dynamique pour des traitements ultérieurs (somme, amplification, etc.).

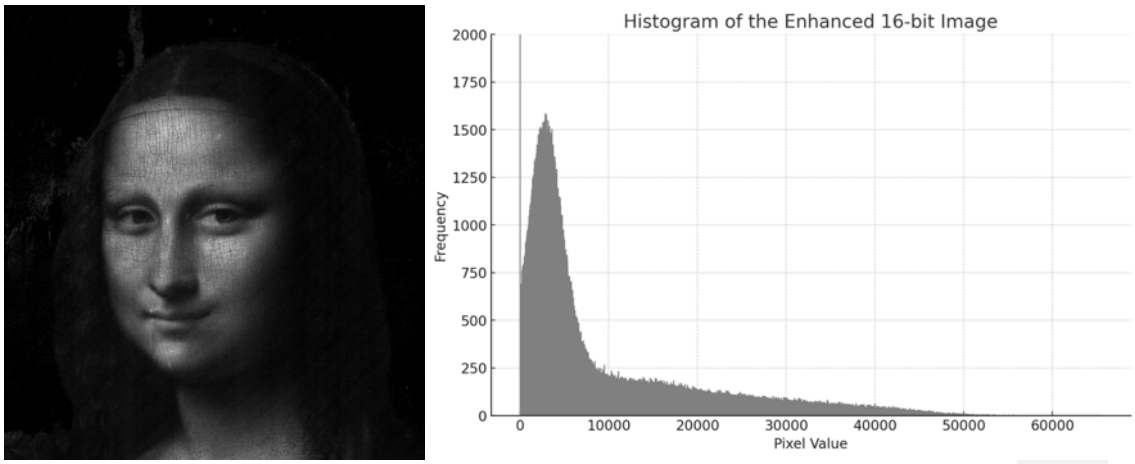



*Figure 56 - Exemple d'image L.A.M. après étirement ou normalisation de l'histogramme de la Figure 55*

L'étirement et la normalisation des histogrammes, qui visent tous deux à redistribuer les niveaux de gris dans une plage donnée, peuvent produire des résultats numériques similaires. Toutefois, la normalisation donne en général de meilleurs résultats pour les images très sombres.

On peut considérer que le facteur $A$ introduit dans les Eq. ( 8 ) et Eq. ( 10 ) intègre implicitement cette étape, puisqu'il agit comme un ajustement global de la dynamique. La normalisation ne se réduit cependant pas à une amplification globale : elle impose une mise à l'échelle dans une plage définie, ce qui garantit une exploitation optimale de la dynamique disponible.

**Égalisation de l'Histogramme (*Histogram Equalization*)**

Objectif : Redistribuer les niveaux de gris pour obtenir un histogramme uniformément réparti, améliorant ainsi le contraste global de l'image.

Processus : Calcul de la fonction de distribution cumulative (CDF) utilisée pour redistribuer les niveaux de gris. Elle est obtenue en cumulant les fréquences des niveaux de gris.

Application de la CDF pour redistribuer les niveaux de gris :

$$I'_{equalized}(x,y) = \mathrm{CDF}\big(I(x,y)\big) \times (N_{max} - N_{min}) + N_{min} \qquad \text{Eq. ( 13 )}$$

Avec $\mathrm{CDF}\big(I(x,y)\big)$ la valeur cumulative pour le niveau de gris $I(x,y)$.

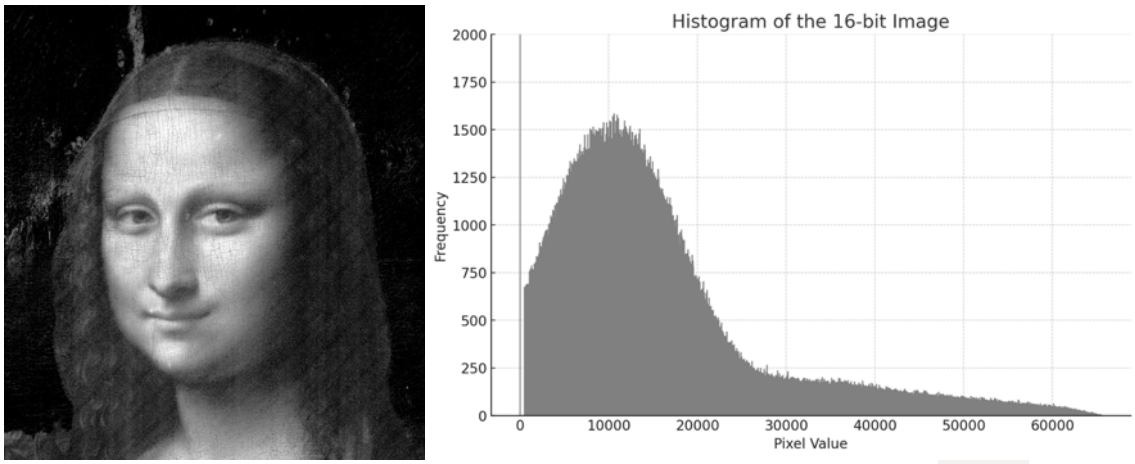



*Figure 57 - Exemple d'image L.A.M. après égalisation de l'histogramme de la Figure 56*

En fin de traitement on obtient une image plus lisible et plus riche en information certains détails ayant été amplifiés par des facteurs puissants, parfois supérieurs à x 1000. Un contraste global supplémentaire peut être appliqué en fonction des informations mises en évidence.

**Des opérations calculées sur 16 bits**

Tous les calculs doivent être effectués sur des images codées sur 16 bits (65535 niveaux de gris) afin de préserver la dynamique nécessaire à la détection d'informations ténues ; un codage sur 8 bits (256 niveaux de gris) écraserait ces écarts en les ramenant à une fraction de niveau de gris, les rendant invisibles.

## 3.2 Illustration du principe de la méthode L.A.M.

La méthode L.A.M. peut être illustrée par 5 cas. L'objectif est de montrer comment un signal masqué dans les profondeurs d'une peinture peut être extrait.

À travers une série de figures analysant le profil de réflectance sur une ligne de 200 pixels prise dans une images acquise à deux bandes spectrales $R_{\lambda_1}$ et $R_{\lambda_2}$, la méthode L.A.M. met en évidence plusieurs points clés :

• la nécessité d'un calage de la réflectance préalable par le facteur proportionnel de correction $p_{cor}$, afin de neutraliser les zones optiquement homogènes et créer un fond différentiel stable ;

• l'effet de l'amplification contrôlée du signal différentiel après neutralisation, pour révéler des écarts infimes — souvent inférieurs à 1/9000e de l'échelle dynamique du capteur ;

• la possibilité de faire apparaître, à partir d'images brutes visuellement identiques, des structures spectrales significatives liées à des couches internes ou à des repentirs.

Pour illustrer ces principes, on suppose qu'on est dans une zone homogène et, arbitrairement, une atténuation invisible du signal de $R_{\lambda_1}$ est introduite au pixel 50, simulant une information sous-jacente enfouie dans les couches de la peinture (par exemple un trait de dessin préparatoire, un *spolvero* ou un repentir), tandis que $R_{\lambda_2}$ reste constante. Au cas n°5 une deuxième anomalie plus faible sera introduite au pixel 125 de $R_{\lambda_1}$, afin de montrer la capacité de la méthode à neutraliser localement certaines zones spectrales tout en révélant ailleurs des déviations résiduelles.

Cas 1 - La différence directe entre $R_{\lambda_1}$ et $R_{\lambda_2}$ reste trop faible pour révéler l'anomalie.

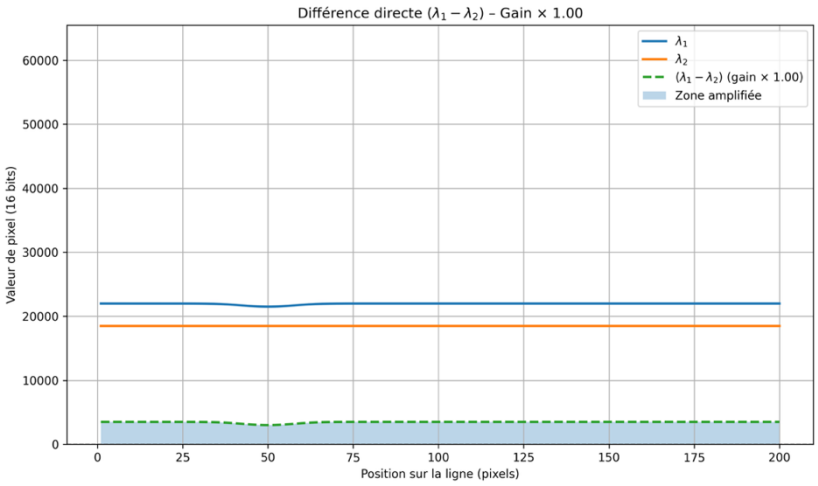



*Figure 58 - Profils de réflectance $R_{\lambda_1}$ et $R_{\lambda_2}$ et le différentiel $R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$ sans amplification.*

Cette figure montre les variations de réflectance mesurées pixel par pixel dans deux images multispectrales acquises aux bandes $R_{\lambda_1}$ et $R_{\lambda_2}$. La courbe en pointillés représente la différence directe ($R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$). On constate que ce signal différentiel reste de faible amplitude, ce qui rend difficile la détection visuelle de l'anomalie introduite au pixel 50 lorsque les deux profils présentent des valeurs proches.

Cas 2 - L'amplification simple augmente le contraste mais reste insuffisante.

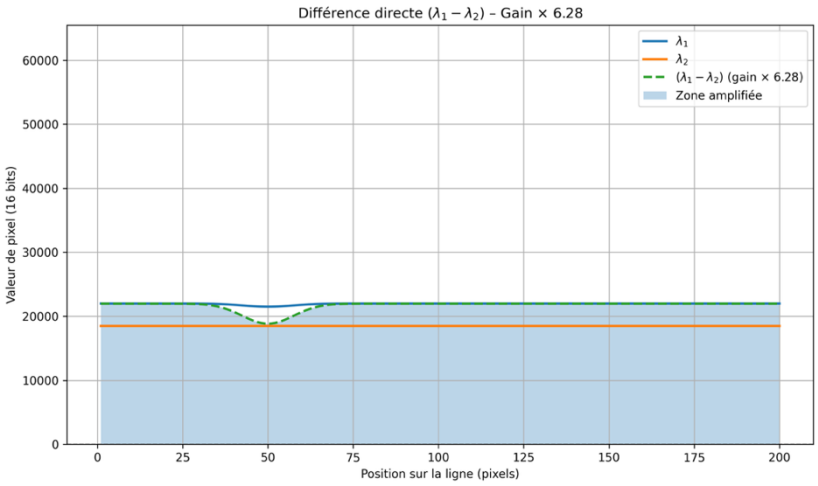



*Figure 59 - Application d'un gain modéré à la différence directe ( $R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$) x $A^{(i)}$*

Cette figure montre les profils de réflectance $R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}$ le long d'une ligne d'image, ainsi que leur différence directe amplifiée par un facteur de gain $A^{(i)}$ (courbe verte en pointillés). Le gain a pour effet de ramener le signal différentiel au niveau moyen de réflectance $R_{\lambda_1}$, mais la déviation introduite au pixel 50 demeure faiblement perceptible et limitée. L'amplification simple améliore très légèrement le contraste sans révéler l'anomalie.

Ces deux figures illustrent le principe du traitement différentiel simple : la soustraction entre deux bandes voisines de réflectance $R_{\lambda_1}$ et $R_{\lambda_2}$ produit un signal brut de faible amplitude. L'application d'un gain accroît un peu le contraste mais ne modifie pas le rapport signal/bruit. Les variations globales dominent et masquent les différences locales, aucune structure sous-jacente ne se distingue clairement.

Cas 3 : Le calage de la réflectance neutralise les variations globales et prépare l'amplification.

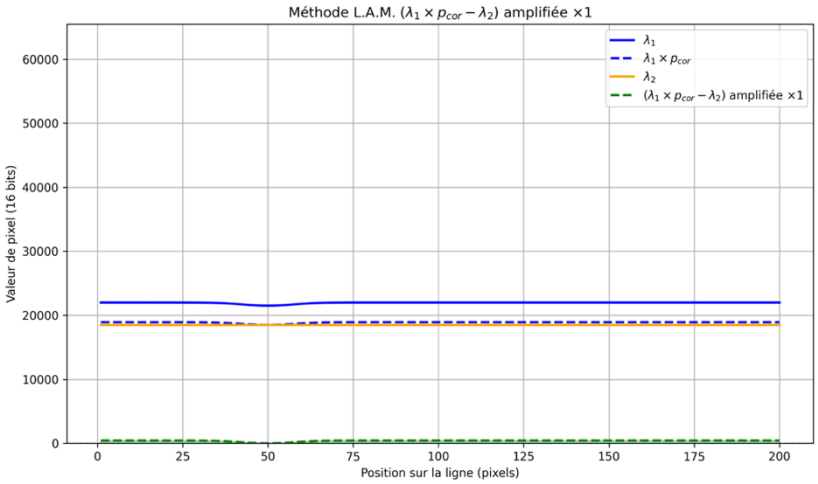



*Figure 60 - Réduction du signal différentiel par mise à l'échelle radiométrique ($R_{\lambda_1} \times p_{cor} - R_{\lambda_2}$) au pixel 50.*

Le profil $R_{\lambda_1}$ (trait bleu plein) est multipliée par le facteur proportionnel de correction $p_{cor}$ (trait bleu pointillé) de manière à aligner sa valeur la plus faible (pixel 50) sur celle de l'image $R_{\lambda_2}$ (trait orange). La différence obtenue (courbe verte en pointillés) devient minimale dans les zones homogènes, nulle au pixel 50. Le signal résiduel ainsi neutralisé constitue une base stable qui pourra être amplifiée pour faire émerger des écarts autrement invisibles.

Cas 4 : L'amplification contrôlée révèle distinctement l'anomalie sur un fond neutralisé.

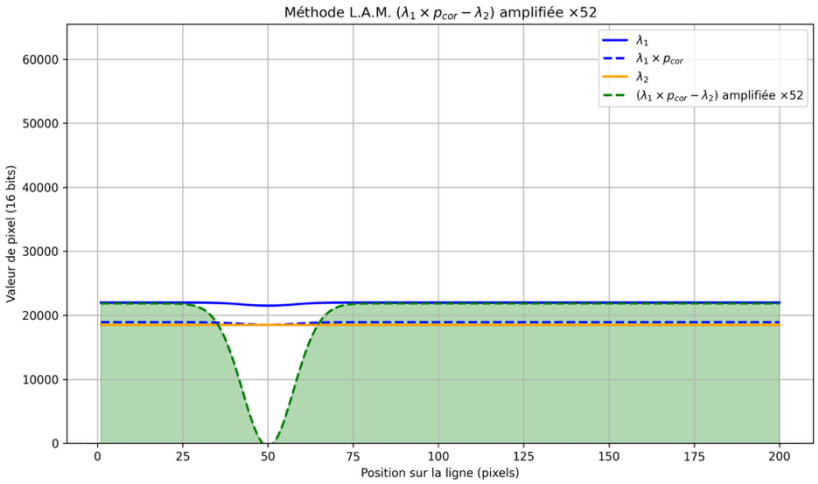



*Figure 61 - Amplification du signal différentiel après calage de la réflectance ($R_{\lambda_1} \times p_{cor} - R_{\lambda_2}$) x $A^{(ii)}$*

La différence calée est amplifiée par un gain $A^{(ii)}$, ramenant l'amplitude au niveau moyen de $R_{\lambda_1}$ (courbe verte en pointillés). La déviation localisée autour du pixel 50, imperceptible dans les images originales, devient manifeste grâce à la stabilité du fond neutralisé. Ce comportement met en évidence une structure sous-jacente au pixel 50 révélée par la rupture du modèle radiométrique attendu.

Les Figure 60 et Figure 61 illustrent le cœur algorithmique de la méthode L.A.M. : l'intensité d'une image de réflectance est ajustée par le facteur proportionnel de correction $p_{cor}$ afin de neutraliser le signal différentiel dans les zones homogènes. Cette mise à zéro locale établit une base stable où toute déviation résiduelle devient un indice matériel.
L'application d'un gain contrôlé révèle alors des variations radiométriques très faibles, invisibles dans les images originales. Dans cet exemple, la déviation autour du pixel 50 devient manifeste grâce à la précision du calage et à la haute dynamique du système : la méthode L.A.M. réside dans ce changement de logique : elle ne renforce pas ce qui est visible, mais fait émerger ce qui ne l'est pas.

Cas 5 : Réponse de la méthode L.A.M. à des anomalies superposées ou en profondeur

Le cas suivant illustre la sensibilité de la méthode L.A.M. à des anomalies superposées ou situées en profondeur dans la couche picturale.

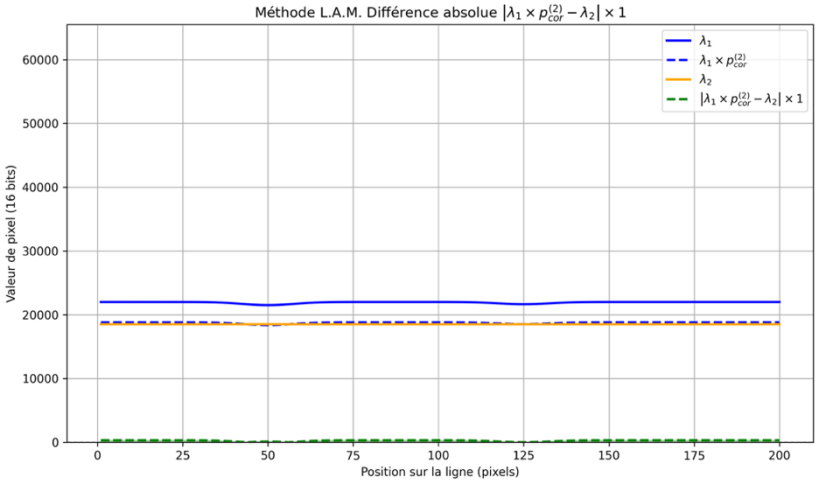



*Figure 62 - Réduction du signal différentiel par mise à l'échelle radiométrique $|R_{\lambda_1} \times p_{cor}{}^{(2)} - R_{\lambda_2}|$ au pixel 125*

Le profil $R_{\lambda_1}$ (trait bleu plein) est multipliée par $p_{cor}{}^{(2)}$ (trait bleu pointillé) pour aligner sa valeur au pixel 125 sur celle de $R_{\lambda_2}$ (trait orange). La courbe verte en pointillés représente la valeur absolue de la différence. Le facteur $p_{cor}{}^{(2)}$ annule la différence au pixel 125 tandis qu'une déviation positive subsiste au pixel 50, révélant une rupture du comportement radiométrique homogène et la présence de deux anomalies distinctes.

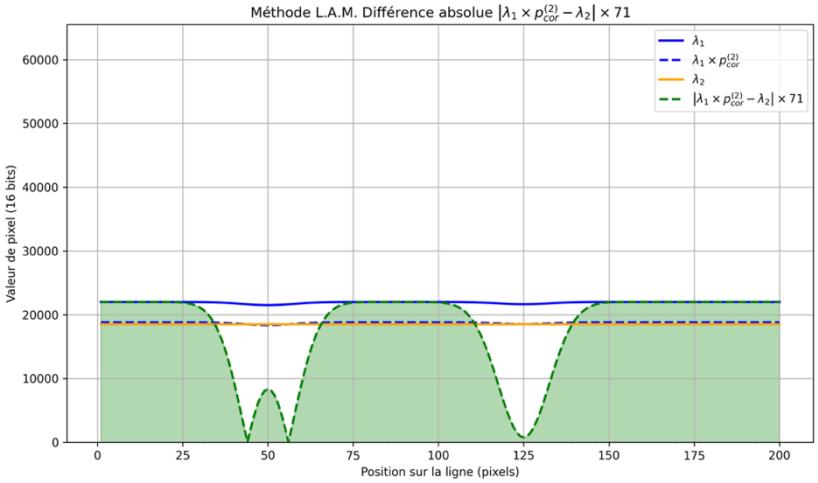



*Figure 63 - Amplification du signal différentiel absolu après calage de la réflectance au pixel 125 : $|R_{\lambda_1} \times p_{cor}{}^{(2)} - R_{\lambda_2}|$ x $A^{(iii)}$*

L'amplification $A^{(iii)}$ de la courbe précédente met en évidence l'anomalie inversée du pixel 50 - le creux négatif devient un rebond positif par la valeur absolue - ainsi qu'un résidu local au pixel 125. Cette représentation permet de visualiser simultanément les deux écarts tout en conservant leur intensité relative ; ils ne peuvent être neutralisés par un même facteur.

L'introduction d'une anomalie plus faible dans $R_{\lambda_1}$ au pixel 125, illustrée par les Figure 62 et Figure 63, montre comment la méthode L.A.M. neutralise certaines zones tout en révélant ailleurs des écarts résiduels. Dans un cas réel, cette anomalie pourrait se superposer à la première et se situer plus en profondeur dans la couche picturale. Le calage a été choisi pour annuler la différence au pixel 125, mais l'anomalie du pixel 50 subsiste. L'amplification produit alors un « rebond » positif adjacent au creux principal : c'est une conséquence du calcul en valeur absolue, non une nouvelle anomalie. Ce cas illustre que la méthode L.A.M. ne révèle pas un signal unique, mais un ensemble de micro-variations traduisant la complexité spectrale et stratigraphique locale.

## 3.3 Exemples

**Exemple d'images L.A.M. pris sur *La Joconde* en comparaison avec les images infrarouges**

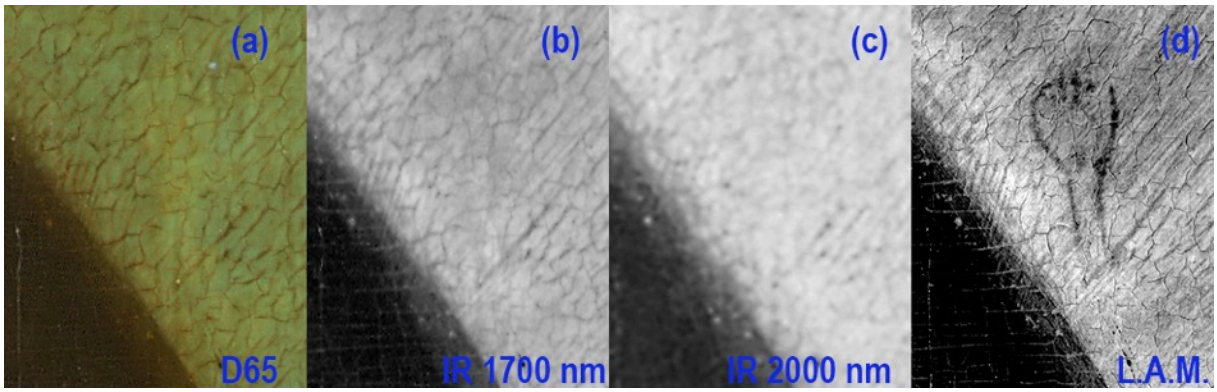



*Figure 64 - Détail de* La Joconde *(21.3 x 16.8 mm), bord de la coiffure en haut à droite - (a) Vue en couleur D65 (b) infrarouge 1700 nm caméra Osiris, (c) infrarouge 2000 nm caméra Hamamastu, (d) image L.A.M. de 560 et 800 nm*

La Figure 64 compare deux images infrarouges d'un détail de *La Joconde* avec une image L.A.M. L'image obtenue avec la caméra Osiris à 1700 nm (b) (Frank, 2019) et celle issue d'une caméra Hamamatsu C 2400-03 IR équipée d'un tube vidicon N 2606-06 à 2000 nm (c) (Mottin, 2006) illustrent les limites de ces dispositifs. Dans le cas de la caméra Hamamatsu, malgré une très haute définition numérique de l'assemblage mosaïqué, équivalente en nombre de pixels à celle de la caméra multispectrale, la résolution optique demeure faible et l'image apparaît floue. Ces infrarouges classiques, même fortement contrastés, ne permettent pas de mettre en évidence le dessin sous-jacent. Celui-ci n'apparaît avec des contours précis et bien définis que grâce aux images L.A.M. (d), étudiées en détail au § 5.8.1, page 165.

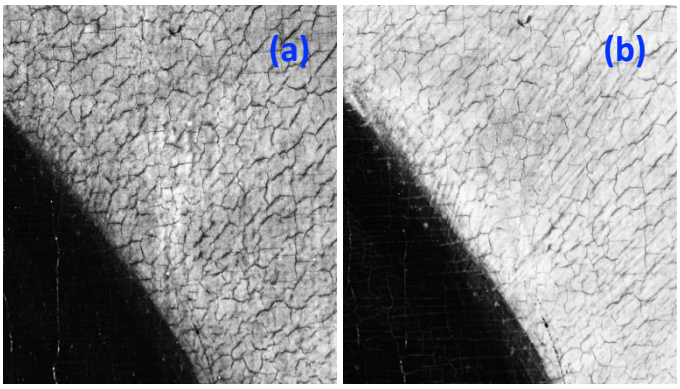



*Figure 65 - Les images brutes 560 nm (a) et 800 nm (b) de la caméra multispectrale du détail présenté en Figure 64d, sont ici affichées avec un contraste exagéré pour accentuer sa visibilité.*

Dans la Figure 65 les images brutes de la caméra multispectrale ayant servi aux calculs de l'image L.A.M. Figure 64d sont ici présentées avec un contraste fortement accentué, afin de contourner la difficulté de distinguer le dessin dans les acquisitions unitaires brutes[9]. Dans l'image à 560 nm (a), on devine un tracé clair sur un fond sombre ; à l'inverse, dans l'image à 800 nm (b), le même tracé se devine en sombre sur un fond plus clair.[10]

[9] Le réseau de craquelures n'altère pas ce tracé et ne provoque aucune discontinuité dans son contour. Cela montre que le dessin se situe en dessous de la couche picturale affectée par les craquelures : celles-ci constituent ainsi un repère fiable pour attester que le tracé appartient bien à une strate plus profonde.

[10] Cette inversion de contraste peut s'expliquer par un sillon d'incision, creusé par la pointe de la mine et comblé de pigment clair : à 560 nm (a), la lumière moins pénétrante s'arrête sur ce comblement et donne le tracé clair, tandis qu'à 800 nm (b), plus diffusante, elle atteint le fond du sillon où subsiste le tracé sombre de la mine. Le calcul L.A.M. supprime la contribution claire et amplifie ce signal sombre, ce qui tend à conforter - ou du moins ne contredit pas - cette hypothèse.

L'exemple suivant transpose le principe de la méthode L.A.M., précédemment illustré par des profils simulés (cas 1 à 5), à un cas réel : celui du détail du ciel de *La Joconde* de la Figure 65.

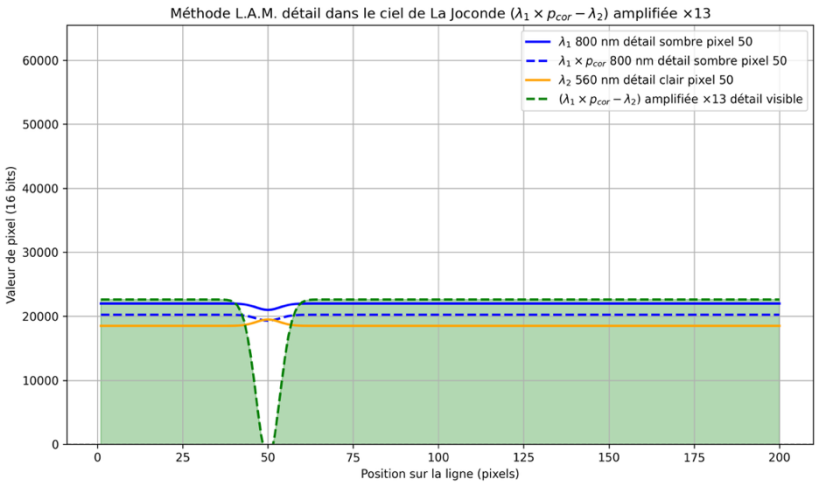



*Figure 66 - Représentation schématique de la méthode L.A.M. appliquée au détail du ciel de* La Joconde *Figure 65.*

La courbe bleue ($R_{\lambda_1}$ = 800 nm) montre le trait sombre du détail au pixel 50 (un creux), tandis que la courbe orange ($R_{\lambda_2}$ = 560 nm) révèle le même détail en clair (une bosse). Après calage de la réflectance ($R_{\lambda_1} \times p_{cor}$) (trait bleu pointillé), la différence spectrale ($R_{\lambda_1} \times p_{cor} - R_{\lambda_2}$) x $A$ (courbe verte en pointillés) met nettement en évidence ce tracé, à peine perceptible dans les images brutes.

Cet exemple de ce détail pris dans le ciel de *La Joconde,* illustre la valeur ajoutée de la méthode L.A.M. : alors que les images multispectrales unitaires donnent une perception incertaine du tracé, l'approche différentielle - combinant calage de la réflectance et amplification - fait apparaître un signal discret, stable et reproductible. Elle montre que la méthode ne se limite pas à un simple renforcement de contraste.

**Exemple de séquence d'images L.A.M. résiduelles sur le visage de *La Joconde*.**

Le calcul résiduel appliqué en $L.A.M._{res}$ permet aussi de faire varier le facteur $p_{cor}$ par incréments fins. Cette variation génère une séquence d'images plutôt qu'une image unique : chaque valeur de $p_{cor}$ neutralise différemment les zones homogènes et met en évidence un résiduel spécifique. Après l'exemple des mains $L.A.M._{sub}$ prenons sur le visage de *La Joconde*, une série d'images $L.A.M._{res}$ (Figure 67(2-5)) obtenue en faisant varier $p_{cor}$ de 0.80 à 1.06 par pas de 0.005. Il est important de souligner que ces résultats reposent uniquement sur des acquisitions dans le domaine visible (480, 520 et 560 nm), la diffusion du blanc de plomb étant suffisante pour révéler des variations en profondeur.

La modulation progressive du paramètre provoque une évolution continue des contrastes différentiels, particulièrement visible dans les zones de modelé du visage : bouche, menton, joues et paupières montrant une évolution dans l'acte créatif. La régularité de certaines transitions tonales et la stabilité de contours au fil des incréments de $p_{cor}$ suggèrent l'existence d'une organisation interne cohérente, distincte du simple bruit de calcul. Ce comportement laisse envisager qu'une structure picturale sous-jacente puisse être présente, sans que la nature de cette structure puisse être précisée à ce stade.

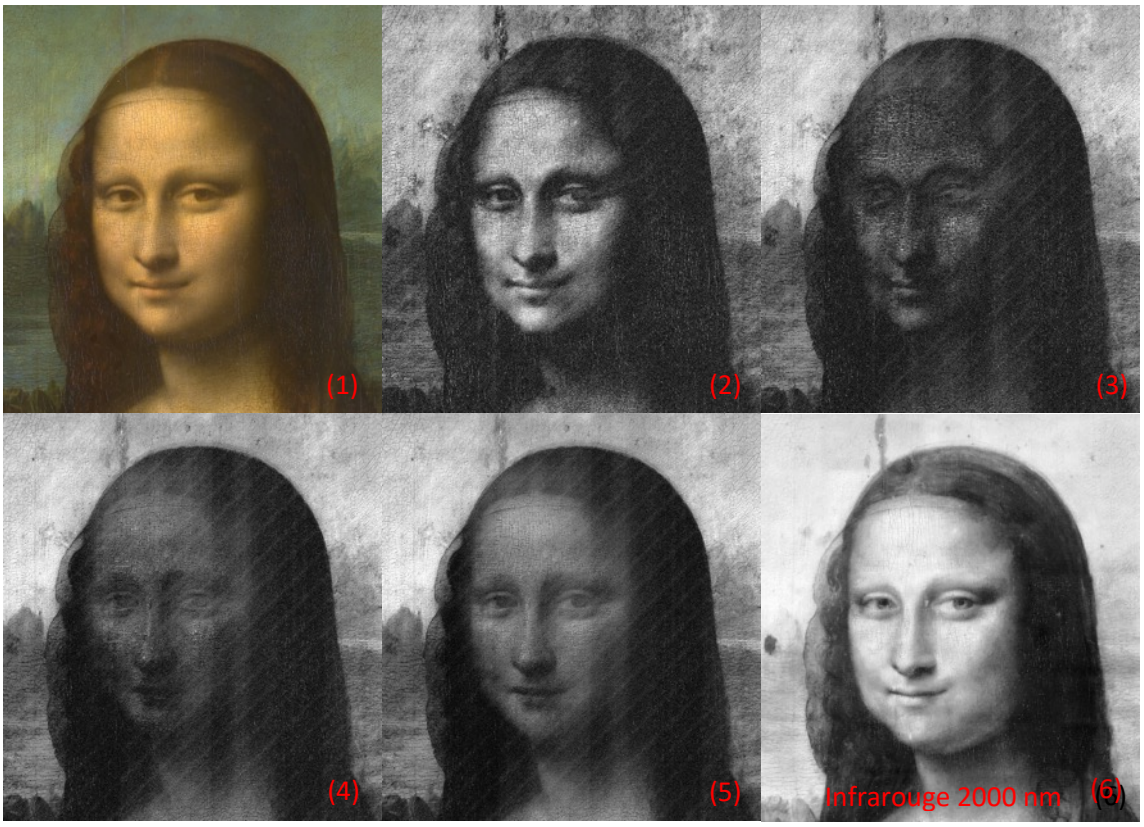



*Figure 67 - Séquence d'images L.A.M. résiduelles du visage de* La Joconde. © P. Cotte

*(1) Image visible ; (2–5) séquence d'images $L.A.M._{res}$ obtenues par variation progressive du facteur $p_{cor}$ de 0.80 à 1.06 à partir des réflectances 480, 520 et 560 nm - (6) comparaison avec une image IR (2000 nm).* © Louvre

*La succession (2–5) illustre la réponse différentielle du calcul résiduel : chaque incrément de $p_{cor}$, modifie la neutralisation des zones homogènes et fait apparaître un résiduel spécifique. La stabilité ou la disparition de certains contrastes au fil des incréments constitue un indicateur de cohérence du signal, suggérant la présence d'une organisation interne compatible avec une structure sous-jacente. Contrairement à l'imagerie infrarouge (6), la méthode L.A.M. appliquée au domaine visible révèle des variations de densité plus fines, plus nuancées et plus nettes, permettant d'appréhender la dynamique interne des couches picturales avec une précision accrue.*

Une séquence vidéo illustrant ce calcul est disponible en annexe numérique : Lien-vidéo
https://youtu.be/HamJYjdvIkA?si=pJTwF8xEzvRoxp4l

L'intérêt de cette séquence réside avant tout dans la démonstration du principe paramétrique : la variation fine de $p_{cor}$ agit comme un révélateur de stabilité, permettant de distinguer les résidus persistants des fluctuations aléatoires. Comparée à l'image infrarouge Figure 67(6), la séquence visible met en évidence que le traitement différentiel, appliqué à des bandes purement visibles, peut atteindre une profondeur d'analyse différente à celle de l'IR, grâce à la diffusion du blanc de plomb dans la couche picturale.

**Exemple des mains pris sur *La Joconde***

La Figure 68(2-5) illustre un calcul $L.A.M._{sub}$ de type soustractif Eq. ( 8 ), appliqué aux filtres visibles $R_{600}$ et $R_{640}$. Plusieurs images $L.A.M._{sub}$ (2–5) sont présentées, chacune obtenue avec une valeur différente du facteur proportionnel de correction $p_{cor}$ (de 0.85 à 1.2), afin d'évaluer la stabilité du détail révélé. On observe ici une évolution des mains, invisible dans l'image infrarouge à 2000 nm (6).

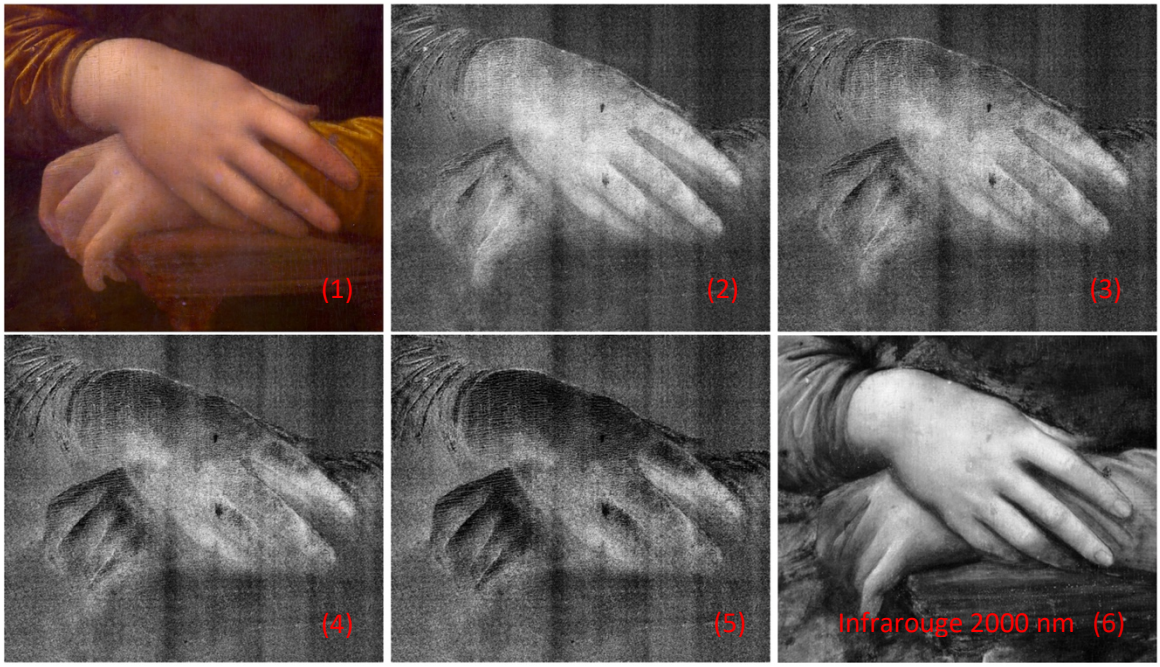



*Figure 68 - Séquence d'images L.A.M. soustractives des mains de La Joconde.* © P. Cotte
*(1) Image visible ; (2–5) séquence d'images $L.A.M._{sub}$ obtenues à partir des bandes visibles 600 et 640 nm pour $p_{cor}$ de 0.85 à 1.2, révélant une évolution des mains ; (6) comparaison avec une image IR classique à 2000 nm.* © Louvre

Une séquence vidéo illustrant ce calcul est disponible en annexe numérique : Lien-vidéo.
(https://youtu.be/R44tncfFJwQ?si=0e4OyAyL0udL_QSl)

## 3.4 1ère validation de la méthode L.A.M. pour la recherche du *spolvero* (Cotte and Simonot, 2020)

Pour illustrer la difficulté de détecter le *spolvero*, en particulier par réflectographie infrarouge, et pour tester l'efficacité de la méthode proposée, une planche de test a été réalisée (voir Figure 69) avec des matériaux, des épaisseurs et des motifs connus.

**a**) Une feuille transparente est percée de trous à l'aide d'une aiguille en suivant les contours pour réaliser un *spolvero* ;

**b**) Une planche en bois recouverte de *gesso* blanc est divisée en 8 zones ;

**c**) Une poudre de noir de carbone très fine est appliquée sur la feuille transparente pour réaliser le *spolvero* sur le *gesso* ;

**d**) Le *spolvero*, laisse une série de points noirs sur le *gesso* ;

**e**) À l'aide d'un applicateur de peinture micrométrique (pas de 10 µm), des épaisseurs croissantes de blanc de plomb sont appliquées sur chaque zone. La peinture est composée de blanc de plomb mélangé à 17 % vol. d'huile de noix avec de la litharge. La fluidité est de 450 poises.

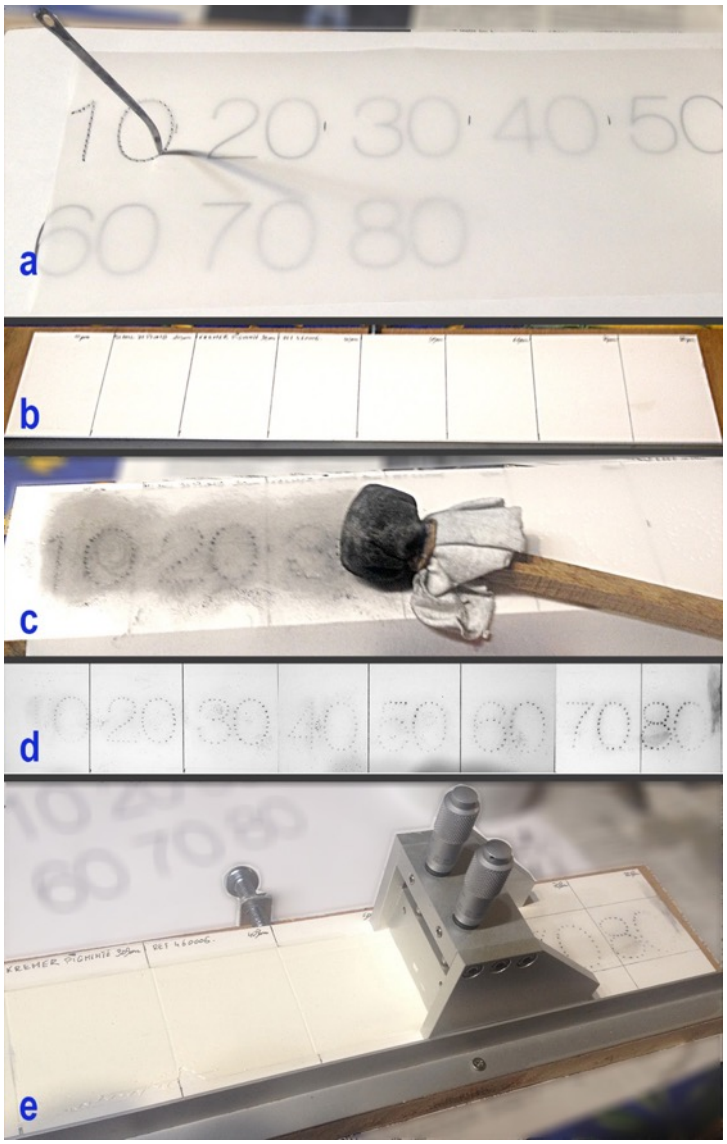



*Figure 69 - Réalisation d'une planche de test à épaisseurs de blanc de plomb croissantes recouvrant des spolveri.*

| Zone | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wet | 100 µm | 200 µm | 300 µm | 400 µm | 500 µm | 600 µm | 700 µm | 800 µm |
| Dry | 10 µm | 20 µm | 70 µm | 180 µm | 270 µm | 350 µm | 360 µm | 370 µm |

*Tableau 5 - Épaisseurs avec applicateur (couches humides) estimées avec comparateur micrométrique (couches sèches).*

L'épaisseur a été mesurée après une période d'un an. Le durcissement de la peinture par l'oxydation du liant au fil du temps a réduit considérablement l'épaisseur finale. En raison des irrégularités des surfaces du support en bois, il y a d'importantes variations dans les épaisseurs de la couche de blanc de plomb une fois sèche. Elles sont données à titre indicatif dans le Tableau 5.

À l'œil nu (voir Figure 70**a**) en observant le résultat final, le *spolvero* est légèrement visible dans les zones 10 et 20 (10 et 20 µm d'épaisseur), disparaît presque dans la zone 30 (70 µm) et est totalement invisible dans les autres zones avec des couches plus épaisses.

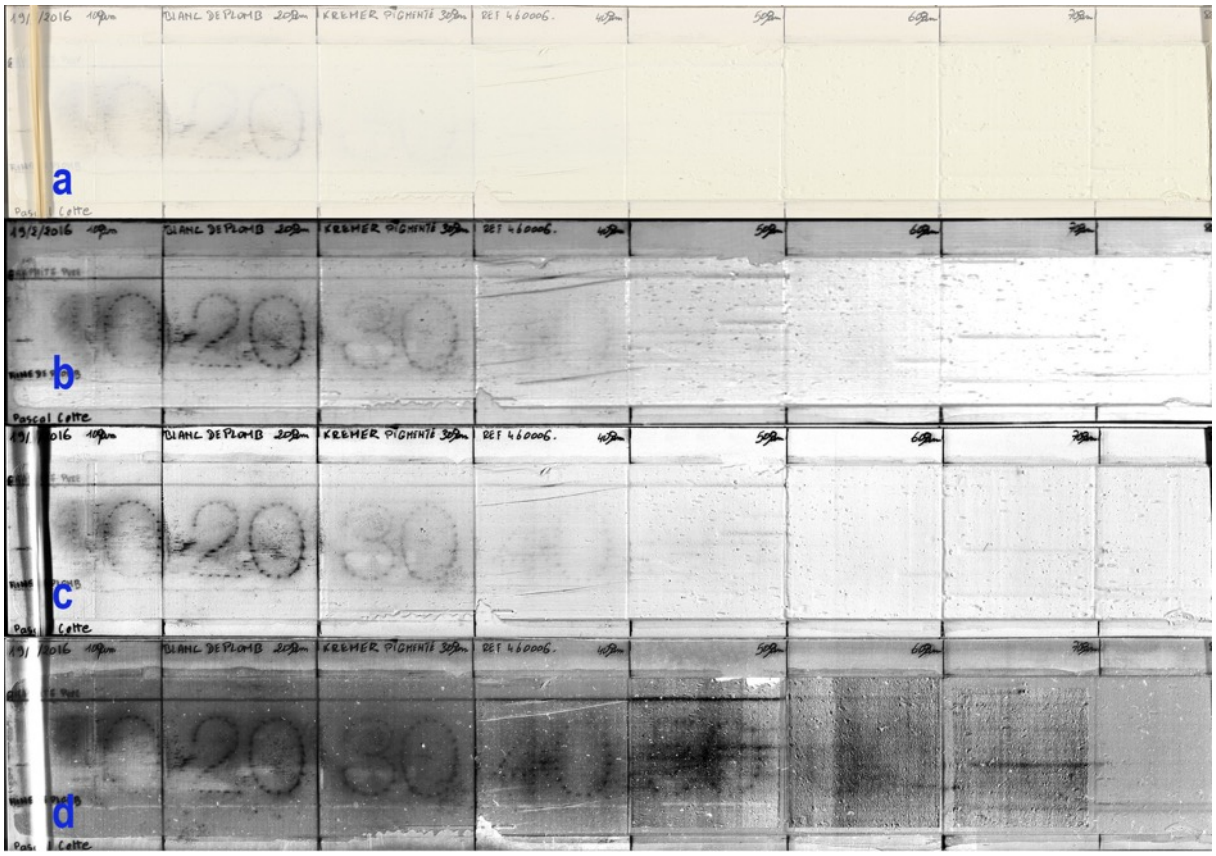



*Figure 70 - Résultat de la planche de test avec blanc de plomb.*
***a**) : Photographie couleur. ; **b**) : Caméra Osiris, réflectographie infrarouge à 1700 nm. 2540 pixels x 450 pixels. ; **c**) : Image infrarouge à 1000 nm de la caméra multispectrale. 3229 pixels x 566 pixels (après binning) ; **d**) : Image L.A.M. 3229 pixels x 566 pixels (après binning).*

**Caméra OSIRIS - Réflectographie IR à 1700 nm**

En 2016, une nouvelle caméra équipée d'un système de balayage mécanique interne, capable de créer des images de haute définition de 16 M. pixels, a été utilisée pour effectuer une réflectographie infrarouge à 1700 nm sur cette planche de test, il s'agit de la même caméra utilisée par le Louvre pour *La Joconde* (Frank, 2019). Deux lampes halogènes éclairent la planche de test. Ce type de capteur d'image IR *InGaAs* est traditionnellement utilisé dans de nombreux laboratoires de musées (Bonanno et al., 2017). Pour s'assurer que les résultats soient comparables aux images L.A.M., l'histogramme de l'image Figure 70**b** a été étiré et égalisé (voir § 3.1.4, page 74). L'image montre le *spolvero* 30 (70 µm d'épaisseur de blanc de plomb), mais montre difficilement le *spolvero* 40, où le contour est à peine perceptible. Les autres *spolveri* restent invisibles.

**Caméra multispectrale, avec lumière collimatée - filtre IR 1000 nm**

L'image obtenue avec le filtre de 1000 nm de la caméra multispectrale est la Figure 70**c**, dont l'histogramme a été étiré et égalisé comme pour la réflectographie IR à 1700 nm (Figure 70**b**). Les deux images obtenues sont comparables : le *spolvero* 40 est encore difficile à voir. Pour cet exemple, l'image IR à 1700 nm n'offre aucun avantage par rapport à l'image NIR à 1000 nm.

**La méthode L.A.M. avec la caméra multispectrale**

La méthode L.A.M. (voir Figure 70**d**) montre clairement les *spolveri* 30 (70 µm), 40 (180 µm), 50 (270 µm) et les contours des zones 60 (350 µm) et 70 (360 µm). Zones 10–40 : même calcul $L.A.M._{sub}$ ; zones 50–70 : autres valeurs de $p_{cor}$.

**Vérifications**

Sur la planche de test scannée avec la caméra multispectrale à 1000 dpi (39 pixels/mm), des mesures spectrales ont été effectuées (voir Figure 71) sur un point noir du *spolvero* (environ ø 0,3 à 0,6 mm) et une zone blanche adjacente. Après étalonnage, les spectres de réflectance diffuse ont été reconstruits en prenant la moyenne d'une matrice de 9 pixels (3x3). Les coordonnées colorimétriques CIE-lab (illuminant D65) des zones correspondantes ont été calculées. La différence de couleur entre le point noir et la zone blanche est bien sûr importante ($\Delta E_{00}$= 51) lorsqu'il n'y a pas de blanc de plomb sur le point noir. Les zones 10 à 60, recouvertes de blanc de plomb, donnent respectivement $\Delta E_{2000}$= 13,64 - 11,11 - 2,09 - 1,52 - 0,82 - 0,65. Pour les valeurs inférieures à une ou deux unités, il faut considérer que la discrimination visuelle entre les deux zones n'est plus possible, ce qui est confirmé par l'observation (Figure 70a).

En analysant les spectres de réflectance sur la plage de 400-1000 nm, on observe des différences significatives dans la zone 10, mais des irrégularités avec la longueur d'onde. Plus l'épaisseur de blanc de plomb est importante, plus la différence entre les courbes est faible et moins les points noirs sont visibles. Dans les zones 40, 50 et 60, les courbes au début du domaine visible (400-500 nm) sont presque superposées, la différence est d'environ 5 % sur le reste des courbes pour la zone 40, 3 % pour la zone 50 et 1 % pour la zone 60. Il faut aussi noter que plus l'épaisseur de blanc de plomb est importante, plus les courbes convergent dans l'infrarouge, jusqu'à se superposer parfaitement dans la zone 60 ; il n'y a plus de différence après 900 nm : le *spolvero* ne sera pas détecté en utilisant uniquement l'infrarouge. On peut supposer que les courbes continuent à se rejoindre au-delà de 1000 nm. Cela pourrait expliquer pourquoi la réflectographie IR à 1700 nm ne détecte pas le *spolvero* si le SNR (*Signal to Noise Ratio*) et la CTF (*Contrast Transfert Function*) sont trop faibles et qu'il est préférable d'utiliser le spectre visible.

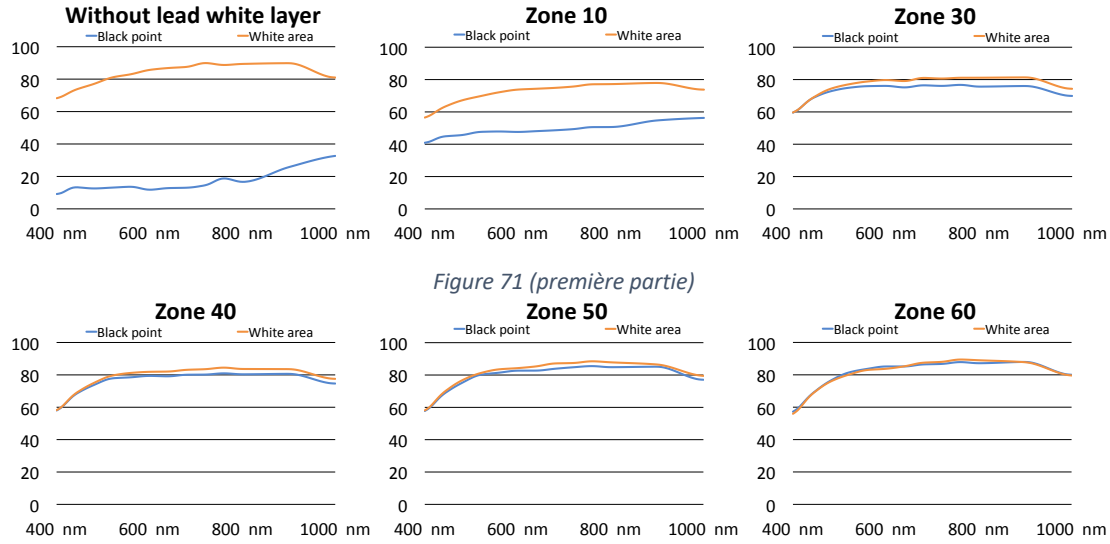



*Figure 71 (première partie)*

*Figure 71 - Spectres d'un point noir (ligne bleue) et de la zone blanche (ligne orange) adjacente. Mesures effectuées sur une zone non recouverte de blanc de plomb, et sur les zones 10, 30, 40, 50, 60.*

Pour les zones 30 à 70, les filtres situés dans la bande centrale (500–800 nm) enregistrent le contraste le plus marqué. Toutefois, une simple différence entre deux filtres a peu de chances de produire un résultat pertinent, car deux mesures isolées ne sont pas nécessairement représentatives de l'ensemble de l'image. En revanche, plusieurs combinaisons de ces filtres et de valeurs de $p_{\mathrm{cor}}$ aussi bien avec $L.A.M._{res}$ qu'avec $L.A.M._{sub}$ , produisent des images où les *spolveri* apparaissent clairement, leur répétition stable dans plusieurs combinaisons est un critère d'authenticité.

## *La Dame à l'hermine*

*Figure 72 - Léonard de Vinci - (Vinci, 1452 - Amboise, 1519)* - La Dame à l'hermine *noyer 55.5 x 45.5 cm - Musée Czartoryski, Cracovie - Huile sur noyer - Dévernissage virtuel* © P.Cotte

Attribuée définitivement à Léonard de Vinci depuis la fin des années 1990, *La Dame à l'Hermine* demeure l'un des portraits les plus emblématiques de la Renaissance italienne. Réalisée vers 1488–1492, durant le séjour de Léonard à la cour de Ludovic Sforza à Milan, l'œuvre représente Cecilia Gallerani, jeune érudite et favorite du duc. Peinte à l'huile sur panneau de noyer, elle illustre la maîtrise progressive du *sfumato* et la recherche d'une expressivité intérieure propre au style léonardien.

Longtemps discutée, son authenticité a été contestée en raison de la main du modèle, que Léonard aurait rapportée ultérieurement, modifiant la composition initiale pour renforcer la présence symbolique de l'hermine aux pattes de lion.

L'auteur a eu le privilège de numériser *La Dame à l'Hermine* en 2007 à Cracovie, au Musée Czartoryski, à la demande du propriétaire de l'époque, Son Altesse le Prince Adam Karol Czartoryski. Cette campagne d'imagerie multispectrale a permis d'appliquer la méthode L.A.M. à une œuvre majeure du corpus léonardien, révélant des éléments invisibles à l'œil nu et offrant un nouvel éclairage sur son élaboration progressive.

## 3.5 2ème validation de la méthode L.A.M. : Étude expérimentale d'une superposition picturale simulée

Dans un travail antérieur consacré à *La Dame à l'hermine* (Cotte, 2014), la méthode L.A.M. a permis de mettre en évidence la présence d'une petite tête d'hermine (Figure 73b+c avec contour), vestige d'une composition initiale que Léonard de Vinci aurait ensuite modifiée.
Ce résultat, s'il était fascinant, nécessitait d'être interrogé en profondeur : s'agissait-il d'un artefact de traitement ? d'un effet secondaire lié à une variation matérielle quelconque ? ou d'une trace réelle, révélée par la méthode, d'un état antérieur authentiquement pictural ?

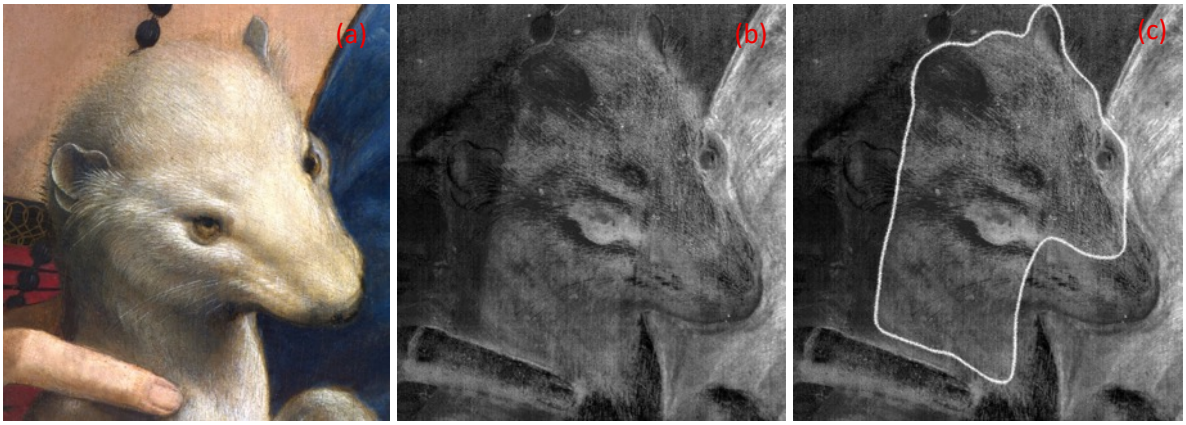



*Figure 73 - Léonard de Vinci - détail de la tête de l'hermine* - La Dame à l'hermine © P. Cotte
*(a) Image multispectrale couleur D65 ; (b) image L.A.M. ; (c) image L.A.M. + contour.*

**Étude d'une œuvre réelle.**

Nous avons choisi de dépasser le cadre de l'expérimentation classique pour engager une véritable démarche de reconstitution historique et technique. L'artiste Monica Céleste a été invitée à reproduire, sur panneau de noyer et avec les mêmes matériaux que Léonard, la séquence créative présumée de *La Dame à l'Hermine* (Figure 74), telle qu'elle ressort des images L.A.M. : une première version sans hermine (a), suivie d'une seconde où l'animal est ajouté (b) puis recouvert (c), selon des procédés picturaux compatibles avec la technique du maître. L'œuvre a été numérisée avec la caméra multispectrale.

*Figure 74 - Monica Céleste - Étude de* La Dame à l'hermine *basée sur les travaux de Pascal Cotte. Huile sur noyer. 2024*

Ce choix méthodologique diffère radicalement des tests élémentaires menés sur le *spolvero*, où il s'agissait de retrouver de simples points noirs sous des couches de blanc de plomb à épaisseur contrôlée. Ici, la méthode L.A.M. est confrontée à une situation beaucoup plus complexe : une œuvre picturale complète, recouverte intentionnellement, dont les traces ne se réduisent qu'à de subtiles variations de réflectance. En reproduisant fidèlement un scénario historique avec les matériaux et gestes du peintre, l'expérience atteint un degré de véracité rarement rencontré en imagerie patrimoniale et interroge directement les conditions mêmes de la visibilité dans l'histoire matérielle d'une œuvre.

**Ce travail engage une série de conséquences théoriques :**

Ce travail soulève des conséquences théoriques. Il déplace le paradigme épistémologique des sciences de l'image : la méthode L.A.M. ne cherche pas à « voir plus », mais à voir autrement, en annulant le signal dominant pour faire émerger les écarts résiduels. Elle interroge aussi le statut de l'image « originale », en montrant que l'histoire d'un tableau ne réside pas seulement dans sa surface, mais dans la stratigraphie de ses repentirs. Enfin, elle opère un véritable renversement historiographique : ce que l'on considérait comme conjecture (révision, changement d'intention) devient observable, mesurable et visualisable.

Pour illustrer, une mesure a été effectuée sur un pixel de l'image sur le front de l'hermine de la version Monica Céleste, en comparant les niveaux de gris obtenus à 900 nm = 25 031 et à 1 000 nm = 19 945, voir Figure 75. Pour calculer $p_{cor}$ = 0.79 (19945/25031).

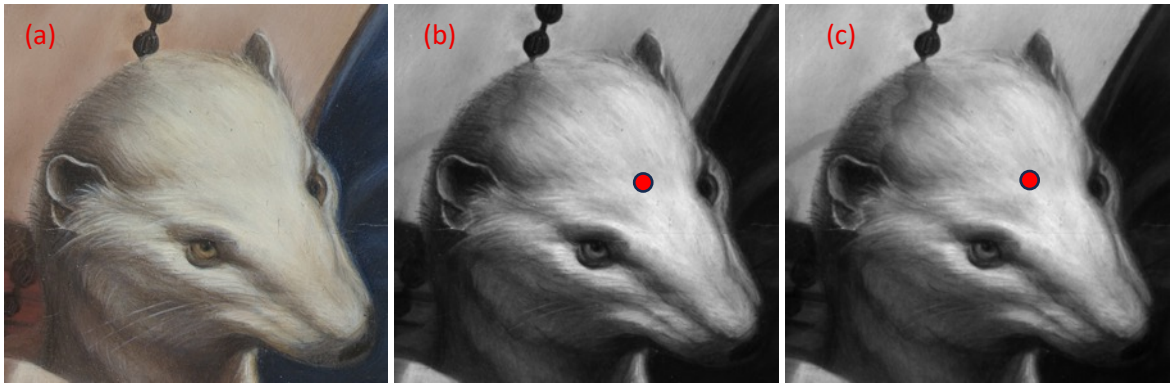



*Figure 75 - Monica Céleste - Détail de l'hermine - (a) Coul. D65 multispectrale - (b) I.R. 900 nm - (c) 1000 nm* © Monica Céleste/P. Cotte
*Point de mesure (rouge) pour l'optimisation de $p_{cor}$.*

Une simple soustraction des deux images (900 nm - 1000 nm) génère une image très sombre Figure 76a, où les écarts de niveaux atteignent sur le point de mesure 5086 sur une échelle de 65535. Cette image, une fois amplifiée Figure 76b- par étirement d'histogramme, normalisation, égalisation -, bien que présentant un contraste légèrement supérieur aux deux images d'origine, n'apporte que peu d'informations utiles concernant les couches sous-jacentes. Elle illustre l'une des limites de la soustraction brute d'images multispectrales.

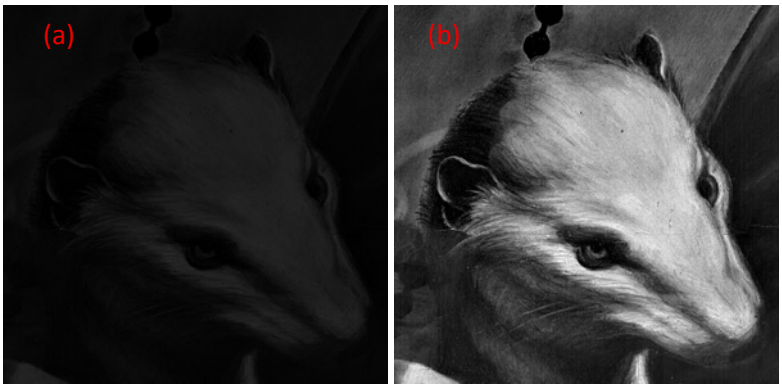



*Figure 76 - Monica Céleste - Détail de l'hermine - (a) I.R. 900 - 1000 - (b) I.R. 900 - 1000 + amplification* © Monica Céleste/P. Cotte

Afin de dépasser cette limite on applique $p_{cor}$ = 0.79 à la réflectance 900 nm.

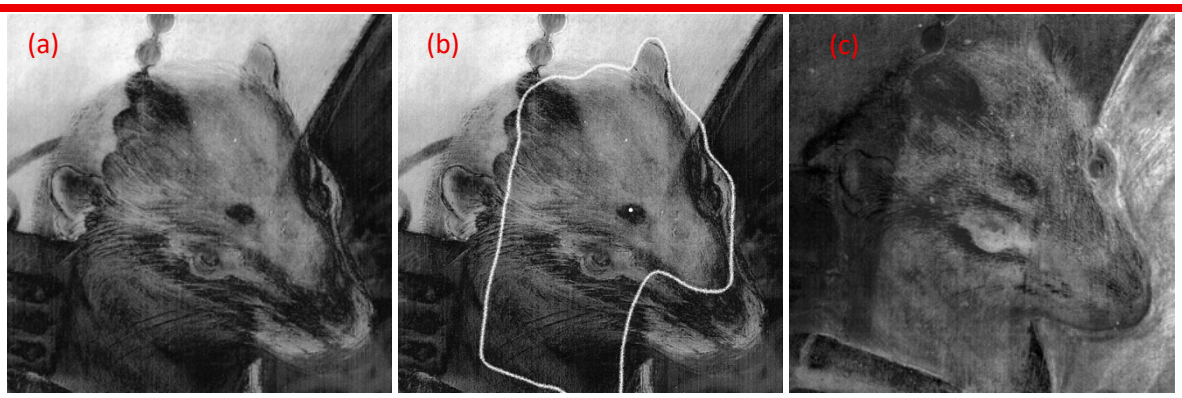



*Figure 77 - Comparaison images (a/b) L.A.M. 0.79•900-1000 - Monica Céleste et (c) image L.A.M. Léonard de Vinci.* © P. Cotte

Ce calage permet, par différence ($p_{cor}$• $R_{900}$− $R_{1000}$), de soustraire la réponse de réflectance moyenne des couches supérieures, c'est-à-dire celles qui réagissent de manière similaire à deux longueurs d'onde voisines. En d'autres termes, les zones picturales dont la composition optique (épaisseur, nature pigmentaire, liant, texture de surface) ne présente pas de variation significative entre les deux images acquises sont mathématiquement neutralisées. Ces zones « optiquement homogènes » produisent des différences nulles ou quasi nulles dans l'image résultante, car leur comportement spectral est stable dans l'intervalle de longueurs d'onde considéré.

Lorsqu'on amplifie cette image de différence, on fait émerger ces micro-variations, dont certaines révèlent précisément la tête de l'hermine initialement peinte. Ce résultat n'est pas sans portée historiographique.

L'image obtenue à partir de la peinture expérimentale de Monica Céleste (Figure 77a + b avec contour) révèle, par la méthode L.A.M., la présence d'une petite hermine identique à celle détectée dans l'œuvre originale de Léonard (Figure 73a et Figure 77c). Ce phénomène ne peut être imputé à un artefact ni à une variation aléatoire du matériau : il apparaît ici comme la conséquence reproductible d'une superposition picturale structurée, conforme aux techniques historiques. Le fait que la version ancienne de l'hermine réapparaisse avec autant de clarté dans une œuvre reconstituée selon un protocole rigoureux valide ainsi non seulement la robustesse instrumentale de la méthode L.A.M., mais renforce l'hypothèse selon laquelle la trace détectée chez Léonard correspond bien à une étape antérieure authentique de son processus créatif. Cette double occurrence - dans l'œuvre ancienne et dans l'œuvre contemporaine simulée - constitue une forme rare de preuve expérimentale en histoire de l'art.

**Autres applications potentielles de la méthode différentielle avec facteur de correction $p$**

Cette logique d'annulation des composantes dominantes suivie d'une amplification sélective du résiduel constitue un principe générique, transposable au-delà de l'histoire de l'art à une grande variété de domaines. Il possède en réalité une portée plus large que l'imagerie multispectrale des peintures. On peut en esquisser des parallèles dans d'autres disciplines : traitement du son (deux microphones annulant un bruit commun), télédétection radar (suppression du sol pour révéler des cibles faibles), imagerie médicale (*dual-energy X-ray imaging*), ou encore physiologie (oxymétrie optique rouge/infrarouge). Ces exemples, cités à titre indicatif, suggèrent que la méthode n'est pas seulement adaptée au patrimoine mais relève d'un principe général de traitement de signal.

## Conclusion

**La méthode L.A.M. : d'un traitement optique à une lecture différentielle des œuvres**

La méthode L.A.M., présentée dans ce chapitre, constitue une avancée méthodologique dans le champ de l'imagerie scientifique appliquée aux œuvres peintes. Elle repose sur une série de traitements numériques précis - calage de la réflectance, soustraction pondérée, calcul de dérivée résiduelle, amplification contrôlée - permettant de neutraliser les zones spectrales homogènes et de faire apparaître des écarts résiduels invisibles autrement. Ces écarts, révélateurs d'hétérogénéités internes, ne se manifestent qu'à condition de disposer d'un système optique très stable, doté d'une large dynamique et d'un éclairage collimaté - conditions que remplit le dispositif que nous avons développé.

Plutôt que de s'appuyer sur une accumulation d'informations visuelles, la méthode L.A.M. repose sur une logique différentielle : elle ne cherche pas à augmenter ce qui est déjà visible, mais à isoler ce qui déroge au modèle spectral attendu, souvent dans des proportions infimes. Ces écarts, dès lors qu'ils sont amplifiés, deviennent signifiants : ils trahissent une couche cachée, un repentir, une forme effacée, une variation matérielle subtile, sans que l'on puisse immédiatement en déterminer la cause exacte, ni la profondeur réelle. En ce sens, la méthode L.A.M. constitue moins un outil d'observation qu'un dispositif d'interrogation.

Les démonstrations présentées dans ce chapitre ont permis d'en poser les fondements théoriques et expérimentaux. Elles montrent que cette méthode, loin d'être une simple technique de rehaussement d'image, modifie notre rapport au visible scientifique : ce qui est amplifié ici n'est pas un signal fort, mais une anomalie faible, une déviation locale, une trace. Elle ne se substitue pas aux autres techniques, mais les complète en proposant un autre régime de lecture, fondé sur la différence plutôt que sur l'accumulation.

Toutefois, pour que cette méthode puisse être pleinement comprise et exploitée, il est nécessaire d'analyser les conditions physiques qui en rendent possible l'efficacité. Les écarts révélés par la méthode L.A.M. ne résultent pas seulement des propriétés spectrales des pigments, mais aussi de la manière dont la lumière interagit avec la surface picturale et ses couches internes.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de ces conditions : il analyse de manière expérimentale l'influence déterminante de la géométrie d'éclairage - en particulier l'usage d'une lumière collimatée proche de l'angle de Brewster - ainsi que le rôle de la résolution, de la dynamique et de la stabilité de la caméra multispectrale.

Des mesures quantitatives sur des mires spécialement conçues, complétées par des comparaisons qualitatives sur *La Joconde*, mettent en évidence les performances optiques et expliquent pourquoi ce dispositif crée les conditions favorables à l'efficacité de la méthode L.A.M.

# CHAPITRE 4

## Conditions expérimentales d'efficacité de la méthode L.A.M.

« *To me there is no greater source of wonder than that the same light which paints all the colors of the rainbow should obey such precise laws of reflection and refraction.* »

Isaac Newton, Opticks, 1704, Book I
*(« Rien ne m'émerveille davantage que de voir la même lumière qui peint toutes les couleurs de l'arc-en-ciel obéir à des lois de réflexion et de réfraction si précises. »)*

# 4 CHAPITRE 4 - Conditions expérimentales d'efficacité de la méthode L.A.M.

## Introduction

Les techniques d'imagerie scientifique appliquées aux œuvres d'art se sont longtemps appuyées sur la réflectographie infrarouge ou la radiographie. Ces méthodes ont apporté des contributions décisives à l'histoire de l'art, mais leurs limites apparaissent désormais clairement : elles peinent à restituer la complexité stratigraphique des couches picturales et échouent parfois à révéler des tracés préparatoires ou des repentirs discrets (voir § 1.3.1 page 13).

L'objectif de ce chapitre est d'examiner les conditions physiques et expérimentales susceptibles d'expliquer les performances particulières de la méthode L.A.M., en confrontant différentes approches expérimentales et appliquées.

Nous analysons ici la géométrie de l'éclairage. L'usage d'une lumière collimatée incidente obliquement, orientée à proximité de l'angle de Brewster, associé à une prise de vue frontale, constitue un choix méthodologique fondateur adopté dès la campagne de numérisation *La Joconde*. Nous montrons, à travers des comparaisons entre illumination diffuse et collimatée oblique, que cette configuration réduit sensiblement les reflets de surface, accroît la saturation colorimétrique et améliore la netteté, la dynamique des images et la diffusion dans les couches picturales.

Nous présentons une série de mesures expérimentales sur des mires spécialement conçues pour tester la détectabilité des structures sous-jacentes. Ces tests permettent de comparer, à paramètres identiques, l'efficacité relative de l'éclairage diffus et collimaté oblique en termes de contraste, de lisibilité et de continuité des traits.

Enfin, nous appliquons cette démarche à *La Joconde*, afin d'illustrer concrètement la manière dont la caméra multispectrale et l'éclairage collimaté oblique modifient la hiérarchie visuelle des informations. La comparaison avec une image réalisée en lumière diffuse met en évidence une restitution plus nuancée, fidèle et informative de la matière picturale.

Ainsi, ce chapitre établit les bases physiques et expérimentales qui permettent de comprendre pourquoi la méthode L.A.M. révèle des informations invisibles aux techniques traditionnelles, et prépare l'analyse détaillée de la technique exécutive de *La Joconde* qui fera l'objet du chapitre suivant.

**Conditions géométriques de l'éclairage pour la méthode L.A.M.**

Lorsqu'on éclaire un tableau, la lumière passe de l'air à un milieu plus réfringent : le vernis protecteur qui généralement recouvre les œuvres. Ce qui se passe à l'interface air/vernis a été décrit dans les travaux du physicien Augustin-Jean Fresnel qui a développé une série d'équations, connues sous le nom relations de Fresnel. Ces équations décrivent la réflexion et la transmission de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre avec des indices de réfraction différents.

## 4.1 Exploitation de l'angle d'incidence avec une lumière collimatée oblique

Les effets de surface, décrits par les relations de Fresnel, offrent l'opportunité d'exploiter au mieux les effets optiques de la lumière réfléchie. Pour optimiser ces phénomènes, des projecteurs spéciaux à lumière collimatée ont été développés, dont les caractéristiques ont été détaillées précédemment (voir § 2.5.2 page 48 et § 6.2 page-sup. - 24 -). Une lumière collimatée apporte des avantages techniques significatifs pour l'analyse des œuvres d'art : elle réduit les reflets parasites, augmente la saturation des couleurs, améliore la pénétration et la diffusion de la lumière dans les couches picturales, et optimise la résolution des images ainsi que la qualité des mesures. Ces points, ainsi que la vérification et la quantification de ces avantages, sont abordés et analysés ci-après.

**Angle de Brewster dans le protocole de numérisation multispectrale**

L'angle de Brewster, identifié dès le XIX$^{e}$ siècle comme la condition optique d'annulation théorique de la réflexion spéculaire de la polarisation parallèle au plan d'incidence ($R_{p12}(\theta_{Brewster}) = 0$ ), constitue un paramètre dans l'étude de l'interaction lumière-matière. En optique appliquée, il est largement exploité dans des domaines aussi variés que la conception des lasers, les systèmes de polarisation ou encore les instruments de métrologie de haute précision. En revanche, son usage dans l'imagerie scientifique des peintures apparaît inédit, en raison de la complexité des surfaces concernées : vernis irréguliers, rugosités microscopiques, hétérogénéité des couches picturales et, surtout, perte rapide de la polarisation une fois la lumière pénétrée dans la matière. L'effet de polarisation reste essentiellement de surface, car la diffusion multiple dans les couches picturales entraîne une perte rapide de cohérence et de directionnalité.

Dans le cadre des recherches présentées ici, l'angle d'incidence a été intégré dès la conception des projecteurs ellipsoïdaux, qui produisent une lumière collimatée qui offrent l'avantage de pouvoir les orienter avec précision de manière contrôlée. L'objectif était double : exploiter les avantages liés à la réduction des reflets spéculaires sur les surfaces vernies, même en l'absence de polariseur, et garantir une constance géométrique stricte lors des acquisitions. Le contrôle simultané de l'incidence et de la distribution angulaire des photons permet ainsi de rendre les conditions expérimentales reproductibles et moins sensibles aux variations externes.

La définition d'un angle de référence, chiffré et unique, s'est imposée comme une exigence méthodologique. Il devait être suffisamment robuste pour convenir à la diversité des matériaux picturaux - surfaces vernies ou non, couches mates, rehauts métalliques comme l'or ou encore collages. Fixer ce paramètre assure la reproductibilité de l'installation par tout opérateur et garantit que chaque bande spectrale soit acquise dans des conditions strictement identiques, évitant l'introduction de biais instrumentaux dans les comparaisons spectrales et les traitements différentiels L.A.M.

Si l'exploitation complète de l'effet de Brewster à l'aide d'un polariseur n'a pas été retenue - en raison notamment d'une perte de flux d'environ 50 % et de la difficulté d'étendre la polarisation à l'infrarouge - le maintien de l'angle d'incidence s'est imposé comme un choix stratégique. Ce protocole, adopté dès la campagne de numérisation de *La Joconde*, est devenu une règle de base des acquisitions présentées dans ce travail, garantissant à la fois un avantage mesurable dans la réduction des reflets et une cohérence méthodologique pour la constitution de la base de données multispectrale.

**Définition de l'angle de Brewster**

L'angle de Brewster peut être déduit de manière géométrique par la relation $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$ ce qui mène à $\theta_1 = arctan(n)$, où $n$ est l'indice de réfraction relatif entre les deux milieux.

Pour $n$ du vernis = 1.51 → $\theta_{Brewster} \approx 56.5°$ ; pour $n$ du vernis = 1.55 → $\theta_{Brewster} \approx 57.5°$

**Numérisation en lumière collimatée avec l'angle de Brewster**

En maîtrisant l'angle d'incidence de la lumière collimatée sur les tableaux, notamment en éclairant *La Joconde* avec un angle de Brewster de 56.5° d'un côté et 57.5° de l'autre (voir Figure 46, page 57), on améliore la qualité de l'éclairage et des mesures, on maximise les avantages pour les calculs des images L.A.M.

Lors de la numérisation d'un tableau les deux projecteurs ellipsoïdaux, disposés symétriquement de part et d'autre de l'œuvre, produisent chacun un rayon lumineux collimaté sous forme d'une bande verticale étroite. Ces deux faisceaux, synchronisés dans leur déplacement, se superposent de manière à balayer progressivement l'ensemble de la surface, selon un principe analogue à celui d'un scanner.

Chaque projecteur est fixé sur un axe autour duquel il pivote légèrement pendant le balayage, ce qui entraîne une faible variation de l'angle d'incidence du faisceau collimaté sur la surface. Conformément au protocole établi depuis plusieurs années, les projecteurs sont placés à 2 m du centre du tableau et le faisceau atteint la surface sous l'angle de Brewster. Ainsi, la numérisation s'effectue, tout au long du balayage, sous une incidence voisine de cet angle spécifique, avec une variation limitée à seulement 1° à 3° entre un bord et le centre du tableau.
Le dispositif est conçu de telle sorte que, durant la première moitié du balayage, le projecteur situé du côté correspondant assure l'essentiel de l'éclairement, tandis qu'au-delà du centre, c'est l'autre projecteur qui prend le relais. Cette configuration garantit que l'ensemble du tableau est enregistré sous une illumination optimisée, maintenue globalement proche de l'angle de Brewster.

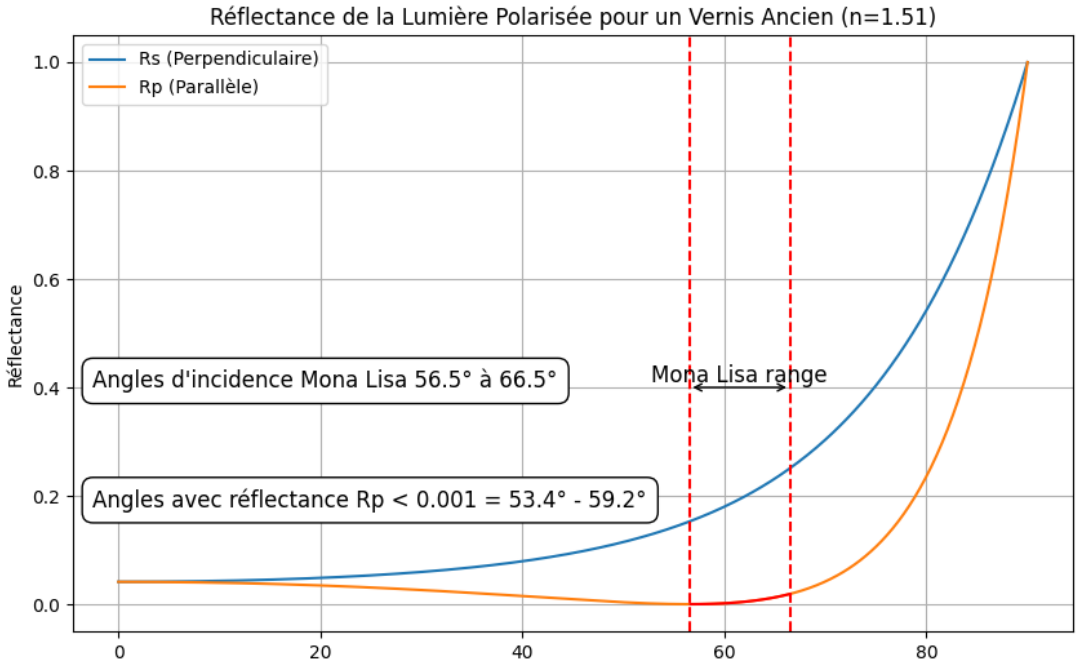



*Figure 78 - Réflectances des lumières polarisées à l'interface air/vernis. Configuration de* La Joconde

**Effet de l'incidence à l'angle de Brewster sur la répartition des polarisation $R_s/R_p$ et son impact optique**

L'incidence à l'angle de Brewster crée un déséquilibre de transmission d'environ 19 % entre $R_p$ et $R_s$, mais cette différence de polarisation n'a pas été jugée suffisante pour induire d'autres effets notables, sur la numérisation de d'œuvres de peinture, d'autant que la polarisation se perd rapidement après

pénétration dans la couche picturale. Son intérêt se situe surtout dans la réduction des réflexions spéculaires.

**L'effet de l'angle d'incidence sur les reflets d'une peinture**

Puisque la polarisation générée à l'angle de Brewster n'apparaît pas pertinente au sein de la couche picturale elle-même, il convient de s'interroger sur son rôle en surface. Des expériences en laboratoire, menées sur des peintures anciennes, confirment cette tendance : malgré la rugosité microscopique des surfaces, l'incidence à l'angle de Brewster réduit sensiblement les reflets parasites avec l'usage d'un analyseur. On peut donc considérer que la géométrie seule, par l'adoption de cet angle, offre déjà un bénéfice mesurable en termes de contraste et de visibilité.

## 4.2 Saturation et clarté selon la configuration d'éclairage

Deux mires de tests ont été utilisées dans le but de vérifier et mesurer les propriétés optiques et physiques des projecteurs à lumière collimatée à 56.5° en comparaison avec une lumière diffuse.

**Conception des mires de test**

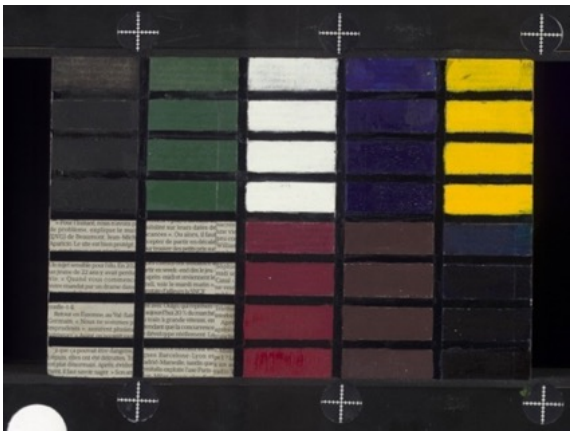


*Figure 79 - Mire sur papier journal (à gauche)*
*Figure 80 - Mire Laboratorio diagnostico per i Beni Culturali, Université de Bologne (à droite)*

**MIRE « Papier Journal » -** (voir Figure 79) Mire de peintures à l'huile appliqués sur du papier journal collé sur une planche de bois et réalisée avec huit pigments : noir d'os, vert de chrome, blanc de titane, bleu outremer, jaune de chrome, bleu de Prusse, brun Van Dyck et carmin. Pour chaque pigment, appliqué avec un pinceau, quatre épaisseurs différentes ont été évaluées visuellement jusqu'à ne plus voir les écritures. Pas de vernis.

**MIRE « UNIBO » -** (voir Figure 80) Mire de peintures à l'huile appliqués sur une planche de bois préparée et réalisée avec douze pigments : ocre Jaune, laque de garance, bleu de Prusse, indigo, terre verte, rouge de plomb, ocre rouge, rouge de cadmium, cinabre, lithopone, blanc de zinc et blanc de plomb appliqués sur une préparation blanche avec des lignes tracées avec différents médiums. Elle comporte 4 bandes avec les douze pigments, dont 3 bandes avec vernis ; respectivement dans cet ordre de haut en bas : sans vernis, cire d'abeille, Dammar et Paraloid B72.

**Acquisition des données et instrumentation**

Toutes les mesures ont été réalisées avec la caméra multispectrale décrite dans cette thèse. Toute la procédure de calibrage, de normalisation et de reconstruction décrites aux § 6.3, page - 35 - a été refaite pour chaque changements de configuration d'éclairage.

La caméra a été placée sur l'axe au centre de la mire, à une distance de 185 cm. La résolution de numérisation est de 500 dpi (pixel de 50 µm).

**Conditions d'éclairage et configurations expérimentales**

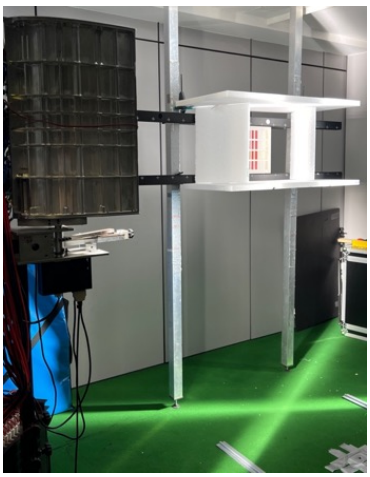
Trois configurations ont été testées :

① Lumière diffuse réalisée avec diffuseurs en plaques de polystyrène (voir Figure 81).

② Lumière collimatée à l'angle de Brewster. (voir Figure 84) + filtre neutre densité 2 sur l'optique.

③ Lumière collimatée à l'angle de Brewster + filtre polarisant $p$ sur les projecteurs pour éliminer la polarisation $s$. Le filtre polarisant couvre le domaine spectral visible. (voir Figure 82).

Pour les configurations ② et ③, les projecteurs sont positionnés à droite et à gauche de la mire à une distance de 2 mètres. Chaque projecteur est constitué de 20 lampes xénon H3, 6000 K de 100 W ce qui représente une puissance lumineuse totale de 2000 W par projecteur. Afin d'assurer des conditions de numérisation identiques (en termes de temps d'exposition et de gain d'amplification) avec et sans filtre polarisant, l'ouverture de l'optique a été réglée à N=5.6. Pour la configuration ② un filtre neutre de densité 2 a été ajouté, réduisant ainsi de moitié la quantité de lumière pour les mesures effectuées sans le filtre polarisant. La configuration ③ est sans filtre neutre de densité 2.



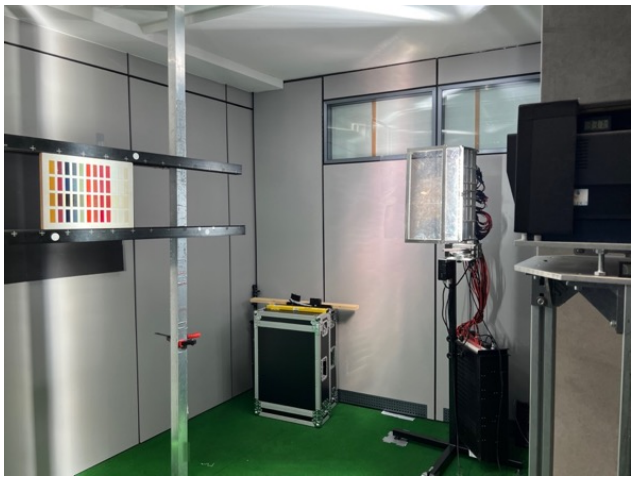


*Figure 81 - Configuration ① Les mires de test sont éclairées par la lumière des projecteurs diffusée sur les panneaux de polystyrènes (←)*

*Figure 82 - Configuration ③ Les mires de test sont éclairées par la lumière des projecteurs équipés d'un filtre polarisant. Le rayon lumineux est incident sur la mire avec un angle de Brewster de 56.5° (→)*

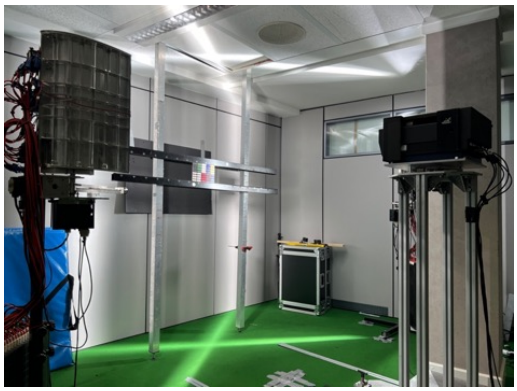


*Figure 83 - Configuration ② Un filtre neutre de densité 2 est posé l'optique de la caméra pour avoir un flux comparable avec la configuration ③ avec filtre polarisant (←)*

*Figure 84 - Configuration ② Les mires de test sont éclairées directement par les rayons collimatés des projecteurs incidents sur la mire avec un angle de 56.5° (→)*

| | L* Clarté | | | ΔL* | C* Chroma | | | ΔC* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ① Diffuse | ② Collimatée | ③ Collim.+Rp | ①-② | ① Diffuse | ② Collimatée | ③ Collim.+Rp | ②-① |
| Vert de chrome | **35,5** | 33,0 | 32,0 | -2,5 | 11,9 | 13,9 | **15,8** | 2,0 |
| Bleu outremer | **22,3** | 15,8 | 12,3 | -6,5 | 16,2 | 24,2 | **25,0** | 8,0 |
| Jaune de chrome | **79,3** | 78,5 | 78,5 | -0,8 | 82,0 | 87,5 | **92,3** | 5,6 |
| Bleu de Prusse | **21,8** | 12,5 | 10,0 | -9,3 | 3,5 | **6,6** | 4,6 | 3,1 |
| Brun Van Dyck | **28,0** | 25,8 | 22,5 | -2,3 | 5,7 | 7,2 | **7,9** | 1,5 |
| Carmin | **30,3** | 28,5 | 26,5 | -1,8 | 26,0 | 29,7 | **31,2** | 3,7 |
| | Moyenne de variations de la clarté = | | | **-3,8** | Moyenne de variations de la chroma = | | | **4,0** |

*Tableau 6 - Mire* Papier journal *- Mesures de Chroma C* et Clarté L* pour les différentes configurations d'éclairage*

| | L* Clarté | | | ΔL* | C* Chroma | | | ΔC* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ① Diffuse | ② Collimatée | ③ Collim.+Rp | ①-② | ① Diffuse | ② Collimatée | ③ Collim.+Rp | ②-① |
| Yellow Ochre | **59,5** | 58,8 | 57,5 | -0,8 | 42,7 | 45,0 | **46,1** | 2,3 |
| Madder Lake | **36,0** | 35,0 | 32,3 | -1,0 | 26,6 | 27,9 | **29,8** | 1,3 |
| Prussian blue | **22,0** | 20,5 | 18,5 | -1,5 | 7,5 | **11,6** | 10,1 | 4,2 |
| Indigo | **33,8** | 32,0 | 29,8 | -1,8 | 2,7 | **4,7** | 3,9 | 2,0 |
| Green Earth | **49,3** | 49,0 | 47,5 | -0,3 | 15,9 | 16,5 | **16,9** | 0,6 |
| Red Lead | **47,0** | 46,8 | 46,5 | -0,3 | 63,0 | 64,4 | **69,7** | 1,4 |
| Red Ochre | **36,3** | 36,0 | 34,5 | -0,3 | 30,7 | 31,3 | **35,6** | 0,6 |
| Cadnium Red | **36,8** | 35,5 | 34,0 | -1,3 | 42,7 | 47,4 | **49,5** | 4,7 |
| Cinabar | **41,0** | 40,5 | 38,8 | -0,5 | 38,7 | 40,9 | **42,9** | 2,2 |
| | Moyenne de variations de la clarté = | | | **-0,8** | Moyenne de variations de la chroma = | | | **2,1** |

*Tableau 7 - Mire* UNIBO *- Mesures de Chroma C* et Clarté L* pour les différentes configurations d'éclairage*

Les valeurs les plus fortes sont en **Rouge**.

Les mesures relevées sont la moyenne d'une matrice de 101 x 101 pixels et la moyenne des quatre applications avec des épaisseurs différentes pour la mire *Papier Journal* et pour la mire *UNIBO* la moyenne des quatre applications avec et sans vernis.

Les mesures ② montrent que la lumière collimatée oblique augmente la saturation des couleurs.

Les mesures ③ ont été réalisées pour évaluer le rôle du phénomène de Brewster. Le filtre polarisant placé sur les projecteurs ne laisse passer que la polarisation $p$, réduisant ainsi les réflexions $s$ à l'interface air/vernis. La lumière collimatée oblique, orientée à l'angle de Brewster, pénètre davantage dans la couche picturale. L'augmentation de la saturation observée résulte donc, en partie, de la meilleure absorption des pigments due à la polarisation $p$.

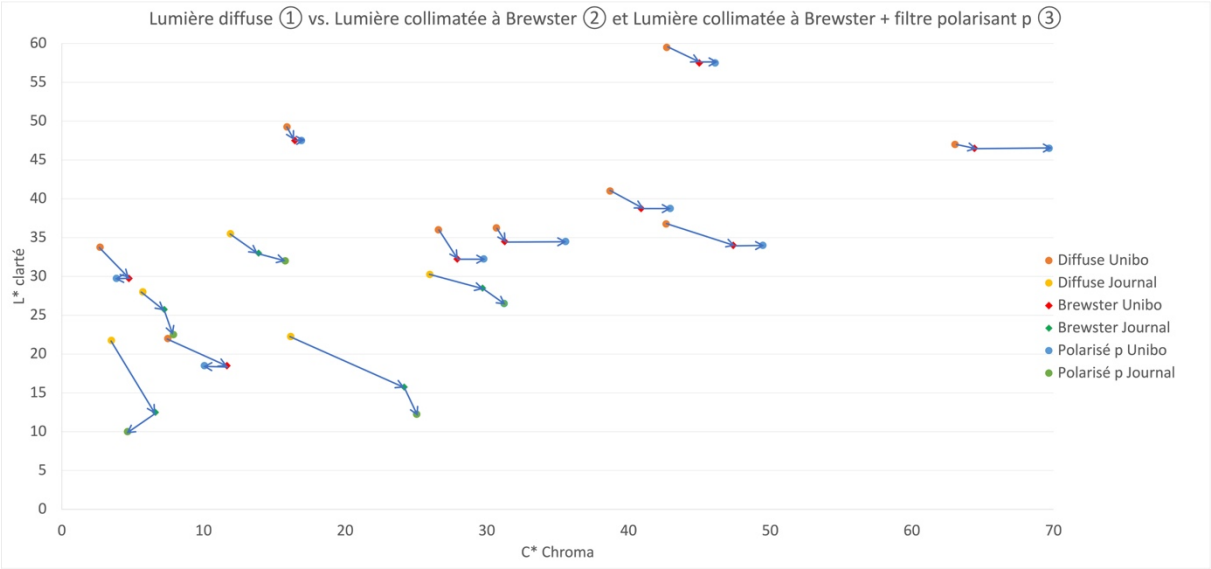



*Figure 85 - Chroma en fonction de la clarté pour les mires* Papier Journal *et* UNIBO
*éclairées en lumière diffuse ① versus collimatée à Brewster ② / versus collimatée à Brewster + filtre pol. p ③.*

**En résumé :**

• La clarté L* diminue en moyenne de 3.8 points pour la mire *Papier journal* et de 0.8 point pour la mire *UNIBO* entre la lumière diffuse ① et la lumière ② collimatée à angle de Brewster.

• La chroma C* augmente en moyenne de 4 et 2.1 points respectivement pour ces deux mires dans les mêmes conditions.

• La configuration ③ (collimatée + polarisation p) renforce encore la chroma C* tout en abaissant légèrement la clarté L*.

## 4.3 Netteté selon la configuration d'éclairage

Les configurations d'éclairages ② et ③ fondées sur un faisceau collimaté oblique, ne se limitent pas à réduire les reflets et à renforcer la saturation chromatique ; elles influent également sur la **dynamique** locale et la **résolution spatiale** des images. Ces deux paramètres conditionnent directement la capacité à distinguer les détails fins et les micro-variations de matière picturale.

Afin de quantifier cet effet, des mesures ont été réalisées sur la mire *Papier journal* pour deux configurations : la lumière diffuse ① et la lumière collimatée à l'angle de Brewster ②.

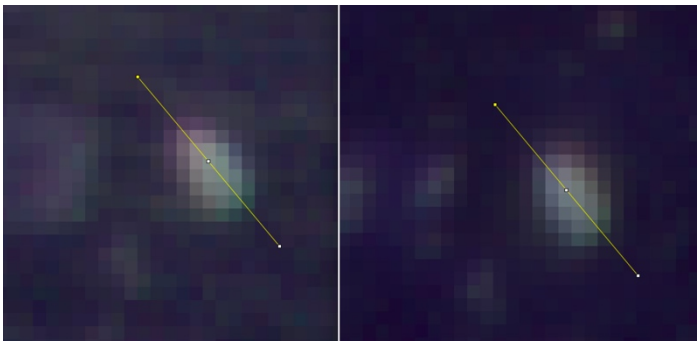


*Figure 86 - Point lumineux - Outremer, mire* Papier Journal*, lumière diffuse ①(←)*
*Figure 87 - Point lumineux - Outremer, mire* Papier Journal*, lumière collimatée à l'angle de Brewster ②(→)*

Un point lumineux d'environ 300 µm, visible sur le pigment bleu outremer, sert ici de repère pour comparer la netteté. En lumière collimatée, il présente un contour plus net, un contraste renforcé et une coloration plus saturée que sous lumière diffuse.

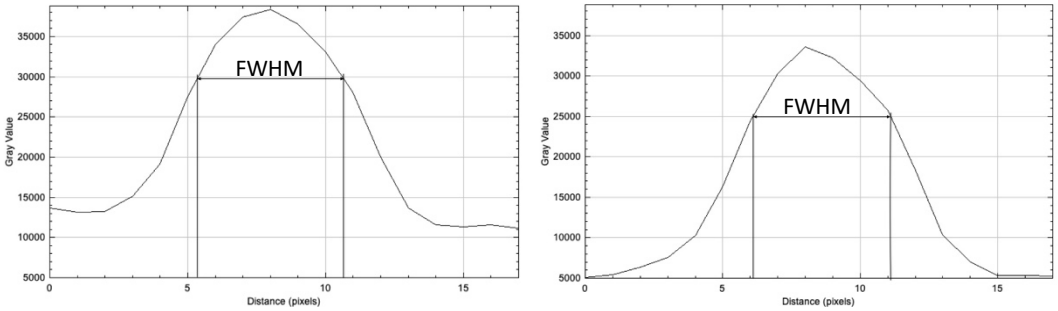



*Figure 88 - Profil d'intensité sur la composante L* (CIELAB D65), lumière diffuse. ①(←)*
*Figure 89 - Profil d'intensité sur la composante L* (CIELAB D65), lumière collimatée oblique. ②(→)*

Les profils d'intensité ont été extraits sur 17 pixels de 50.8 µm. Pour chaque profil, la largeur à mi-hauteur (FWHM) a été calculée entre les deux pixels 5-12.

$$I_{1/2} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} + I_{min} \qquad \text{Eq. ( 14 )}$$

correspondant à la moitié de l'amplitude effective du signal. Ce paramètre, appliqué à la composante de luminance L*, mesure directement la diffusion latérale du flux lumineux.

Les résultats obtenus montrent que la FWHM passe de 5.4 pixels (≈ 274 µm) en lumière diffuse à 5.0 pixels (≈ 254 µm) en lumière collimatée oblique, soit un gain de netteté d'environ 9 %. Cette diminution de la largeur traduit une réduction de la diffusion latérale et une meilleure concentration du front lumineux, confirmant l'avantage de la collimation pour la mise en évidence des micro-détails.

**Analyse fréquentielle**

La netteté et le contraste ont ensuite été comparés à l'aide d'une analyse fréquentielle fondée sur la Transformée de Fourier et les profils radiaux (Gonzalez, 2019). Cette méthode sépare les basses fréquences, associées aux structures globales, des hautes fréquences, qui traduisent les détails fins.

Les profils radiaux mesurent l'intensité en fonction de la distance au centre du spectre de Fourier ; leur moyenne et leur variance caractérisent la répartition des fréquences spatiales dans l'image.

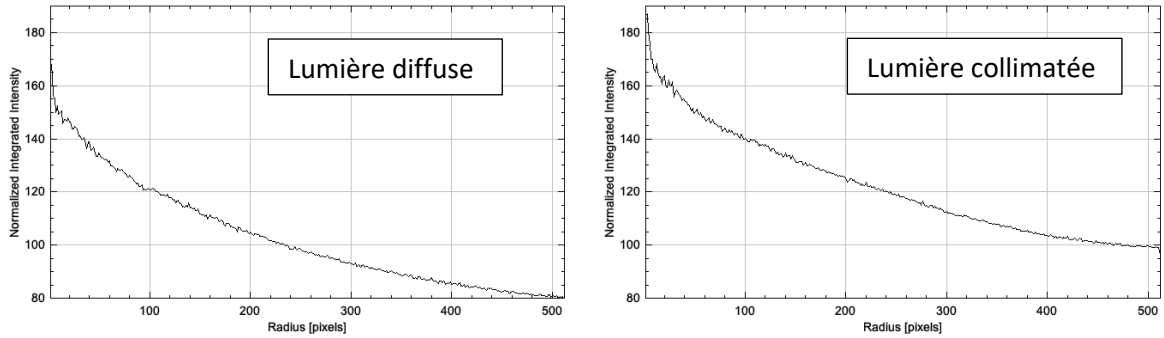



*Figure 90 - Profil radiaux des images tests : lumière diffuse ①(←), lumière collimatée oblique ②(→)*

**Résultats**

Les résultats pour les deux images sont les suivants :

<u>Image en lumière diffuse ① (plus floue) :</u>

- Moyenne des intensités : $\mu_{diffuse} = 150.02$
- Variance : $\sigma^2_{diffuse} = 43.99$

<u>Image en lumière collimatée oblique ② (plus nette) :</u>

- Moyenne des intensités : $\mu_{collimatée} = 167.56$
- Variance : $\sigma^2_{collimatée} = 69.06$

Les profils radiaux montrent que l'image en lumière collimatée a une intensité moyenne plus élevée et une variance plus forte, signes d'un meilleur contraste et d'une meilleure conservation des détails. À l'inverse, l'image en lumière diffuse apparaît plus faible et plus floue. L'analyse fréquentielle confirme ainsi que la lumière collimatée produit des images plus nettes et contrastées.

**Synthèse**

Les mesures photométriques et fréquentielles concordent : l'éclairage collimaté oblique augmente à la fois la dynamique, la résolution.

## 4.4 Impacte sur la diffusion sous-surfacique

Contrairement aux phénomènes de surface, l'effet à l'intérieur de la couche picturale englobe des processus plus complexes tels que l'absorption et la diffusion, qui modifient profondément la manière dont la lumière traverse et se propage à l'intérieur de la peinture.

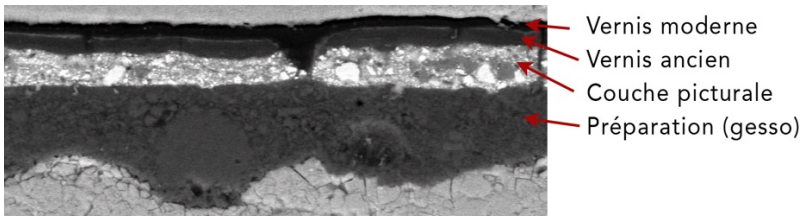



*Figure 91 - exemple de coupe stratigraphique d'une couche de peinture du XV^e^*

La compréhension de la profondeur de pénétration de la lumière dans les couches picturales constitue un enjeu important pour l'étude non invasive des œuvres. La lumière incidente collimatée oblique, en interagissant avec les grains de pigments et les liants, se propage en profondeur en subissant successivement diffusion et absorption. Cette pénétration conditionne la capacité d'une technique optique à révéler des informations enfouies : tracés préparatoires, repentirs ou couches picturales sous-jacentes.

Bien que ces phénomènes puissent être décrits par des modèles de diffusion complexes, leur quantification reste difficile dans le cas des couches picturales réelles.

Nous privilégions donc une approche expérimentale contrôlée, « toutes choses égales par ailleurs », qui isole la seule variable "géométrie d'illumination" d'un éclairage diffus versus collimaté oblique. L'effet de cette géométrie est évalué à partir d'un indicateur simple et reproductible, la fraction de pixels sombres, directement reliée à la détectabilité des structures sous-jacentes.

**Présentation de l'expérimentation sur la mire UNIBO.**

La mire UNIBO, réalisée sur bois préparé (gesso), comporte sous les couches de pigments trois lignes tracées respectivement au fusain (*Charcoal*), au crayon (graphite) et au *carbon black*, ainsi que le nom manuscrit du pigment. Cet agencement constitue une configuration expérimentale adaptée pour comparer, à paramètres d'acquisition constants, l'effet de la géométrie d'éclairage sur la détectabilité des structures sous-jacentes : ① lumière diffuse (voir Figure 81) et ② lumière collimatée oblique (voir Figure 84) décrits au § 4.2 page 97.

Traitements : calculs L.A.M. réalisés sur les réflectances 1000 nm et 900 nm avec $p_{cor} = 0.8$, selon une procédure identique pour les deux configurations d'éclairage.

**Mesures :** la visibilité des tracés enfouis a été évaluée à l'aide de l'indice de pixels sombres (IPS), ou *Dark Pixel Ratio (DPR)*, défini par :

$$DPR = \frac{N\ (I < \tau)}{N_{total}} \qquad \textit{Eq. ( 15 )}$$

où $N\ (I < \tau)$est le nombre de pixels dont l'intensité est inférieure au seuil $\tau$, ici fixé à 92/255 après normalisation (5–95 %).
Cet indice représente la fraction de pixels absorbants révélant les tracés enfouis.

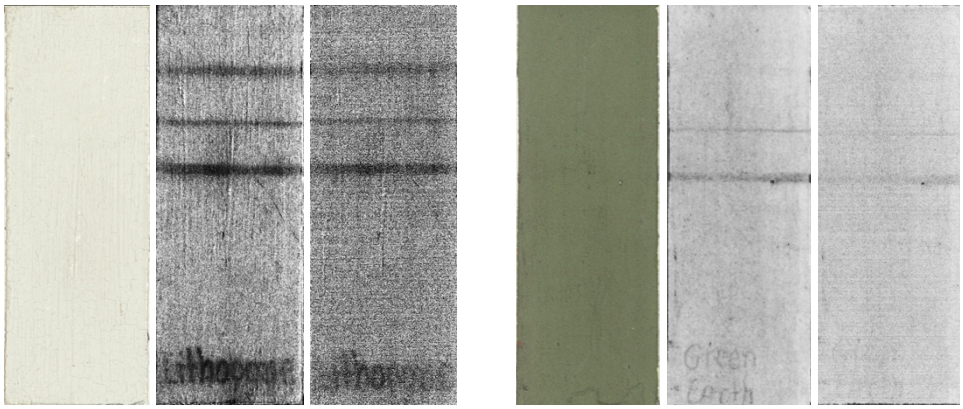


*Figure 92 - Mire UNIBO (lithopone et terre verte sans vernis), L.A.M. comparatives*
*De gauche à droite : Lithopone couleur D65 / L.A.M. collimatée / L.A.M. diffuse - Terre verte couleur D65 / L.A.M. collimatée / L.A.M. diffuse. Paramètres d'acquisition identiques (ND 2 en collimaté). La lisibilité des inscriptions est préservée en collimaté et réduite en diffus pour les deux pigments.*

**Synthèse des résultats**

Sur la zone « Lithopone », l'indice de pixels sombres (DPR) calculé avec un seuil fixé à 92 / 255 passe de 0,409 en lumière diffuse à 0,502 en lumière collimatée oblique, soit un gain d'environ **+10 %.**

Sur la zone « *Green Earth* », un seuil adapté de 185 / 255 révèle 17,5 % de pixels sombres en diffus contre 56,7 % en collimaté, soit un écart de près de **+40 %.**

Les deux mesures montrent la même tendance : la lumière collimatée oblique augmente la proportion de pixels absorbants et améliore la visibilité des tracés sous-jacents.

## 4.5 Application de l'éclairage collimatée à l'angle de Brewster sur *La Joconde*

Comparaison d'un détail de *La Joconde* numérisé en lumière diffuse et collimatée à l'angle de Brewster

*Figure 93 - Comparaison d'un éclairage diffus (←) © Musée du Louvre - et un éclairage collimaté à angle de Brewster (→). © P. Cotte -*

Les deux images, acquises à définition quasi-identique (environ 372 dpi), montrent un même détail de *La Joconde*. L'image du Louvre11, obtenue en éclairage diffus (RGB, 371 dpi), présente un contraste accentué qui renforce la visibilité des craquelures mais atténue les nuances chromatiques. Celle réalisée avec la caméra multispectrale et un éclairage collimaté à l'angle de Brewster offre, au contraire, une restitution plus nuancée et fidèle des tonalités, particulièrement dans les zones sombres où les dégradés apparaissent plus continus et mieux différenciés.

L'image du Louvre se caractérise par une légère dominante jaune-orangée et par une tonalité globale relativement uniforme. L'image multispectrale, plus équilibrée, restitue des modulations fines qui rendent sensibles les transitions colorées et la profondeur des ombres. Les motifs décoratifs recouverts partiellement par la bordure du voile, visibles dans les deux cas, sont altérés dans la version en lumière diffuse par la présence excessive des craquelures et par des reflets de surface ; en lumière collimatée, ces mêmes motifs se détachent avec davantage de netteté et bénéficient d'un relief plus marqué.

La perception de la matière picturale s'en trouve transformée : dans l'image du Louvre, l'attention se porte d'abord sur le réseau de craquelures, qui domine visuellement la composition. Dans l'image obtenue en lumière collimatée, ces craquelures demeurent lisibles, mais elles se fondent dans une perception plus intégrée de la surface, orientée vers la texture picturale et la qualité d'exécution. Enfin, la dynamique tonale diffère : la prise de vue diffuse présente un contraste excessif, probablement lié à la saturation du capteur, entraînant une perte de nuances dans les hautes et basses lumières. L'image multispectrale, en revanche, conserve ces micro-contrastes et restitue la continuité lumineuse des transitions, assurant une perception plus fidèle des valeurs et des détails.
En définitive, cette comparaison ne met pas seulement en évidence la réduction des reflets et du bruit ; elle révèle un changement de hiérarchie visuelle. L'image traditionnelle privilégie la lecture du vieillissement matériel de la surface, tandis que l'image multispectrale en lumière collimatée réoriente le regard vers la peinture elle-même — vers la main du peintre et la subtilité des effets optiques qui la constituent.

---

[11] *L'image entière de* La Joconde *en haute résolution et lumière diffuse du laboratoire du Louvre est disponible sur ce lien : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/Mona_Lisa%2C_by_Leonardo_da_Vinci%2C_from_C2RMF_retouched.jpg*

## Conclusion

L'analyse conduite dans ce chapitre a mis en évidence le rôle central de la géométrie d'éclairage dans les performances de la méthode L.A.M. L'usage d'une lumière collimatée, réduit significativement les reflets de surface, accroît la saturation colorimétrique, améliore la dynamique et la netteté des images. Ces effets, objectivés par des mesures quantitatives sur mires et confirmés par l'application à *La Joconde*, confèrent aux images multispectrales une lisibilité et une stabilité supérieures à celles obtenues en lumière diffuse.

Ces résultats montrent que l'éclairage collimaté oblique n'est pas un simple paramètre technique, mais un véritable élément méthodologique fondateur, garantissant à la fois la qualité intrinsèque des acquisitions et leur reproductibilité dans le temps. Il constitue une condition de possibilité pour que la méthode L.A.M. puisse amplifier des contrastes spectro-structuraux faibles et exploiter des signaux enfouis dans les couches picturales.

Afin d'en rendre compte de manière systématique, les avantages majeurs de la lumière collimatée et de la caméra multispectrale peuvent être regroupés selon les points suivants :

**Une profondeur de pénétration accrue**

La collimation impose une direction privilégiée aux photons incidents, réduisant la probabilité de diffusions précoces en surface et favorisant leur propagation rectiligne vers les couches plus profondes. Ce mécanisme accroît la capacité à révéler des tracés préparatoires, des repentirs ou des *spolveri*, souvent indétectables en illumination diffuse.

**Une amplification des contrastes spectro-structuraux**

En accentuant les effets de diffusion différentielle liés aux hétérogénéités de la couche picturale, l'éclairage collimaté oblique met en évidence des variations subtiles de contraste. La méthode L.A.M. exploite ensuite ces différences pour amplifier des signaux faibles enfouis dans la matière picturale, permettant la restitution d'informations fines et invisibles autrement.

**Une saturation colorimétrique renforcée**

La réduction des réflexions parasites, combinée à la multiplication des interactions internes entre grains de pigments, accroît la sélectivité spectrale. Il en résulte une pureté chromatique améliorée, un contraste visuel accru et une fidélité colorimétrique supérieure. Ces qualités renforcent la précision des mesures et la capacité discriminante du dispositif.

**Une réduction des reflets de surface**

En limitant les angles d'incidence aléatoires, l'éclairage collimaté oblique diminue sensiblement les réflexions spéculaires qui masquent la lecture des détails. Cet avantage est particulièrement décisif pour les œuvres vernies, où la distinction entre structures picturales et artefacts optiques est autrement compromise.

**Une mise en évidence de détails dissimulés**

Les comparaisons expérimentales montrent que la combinaison de l'éclairage collimaté oblique et du traitement différentiel L.A.M. permet de révéler des inscriptions, tracés ou repentirs invisibles en lumière diffuse. Ces découvertes constituent des apports déterminants pour l'iconographie et pour l'histoire technique des œuvres.

**Une stabilité méthodologique accrue**

Le contrôle rigoureux de l'angle d'incidence et de la distribution directionnelle de la lumière assure une reproductibilité élevée des acquisitions. Cette stabilité est indispensable pour toute analyse différentielle multispectrale et garantit la comparabilité des résultats entre œuvres, campagnes ou institutions. Elle confère à la méthode une véritable robustesse épistémologique.

**Le rôle déterminant de la caméra multispectrale**

Au-delà de l'éclairage, les performances du système reposent sur l'architecture instrumentale de la caméra développée dans le cadre de cette recherche. Trois qualités sont décisives :

Une très haute résolution spatiale, permettant de documenter à l'échelle micrométrique des détails picturaux inaccessibles aux dispositifs conventionnels ;

Une dynamique étendue, autorisant la détection simultanée de signaux faibles et intenses dans une même acquisition ;

Une stabilité et reproductibilité des mesures, conditions essentielles pour bâtir une base de données fiable et cumulative.

Associées à l'éclairage collimaté oblique, ces caractéristiques expliquent pourquoi la méthode L.A.M. surmonte les verrous rencontrés par la réflectographie infrarouge.

**Au-delà des limites de la réflectographie infrarouge**

Bien qu'elle ait constitué une avancée décisive au XX$^{e}$ siècle, la réflectographie infrarouge demeure contrainte par une résolution limitée, une absorption sélective de nombreux pigments et une profondeur d'exploration insuffisante. Elle échoue fréquemment à discriminer des tracés préparatoires complexes ou des repentirs subtils.

La méthode L.A.M., en conjuguant une caméra multispectrale haute résolution et un protocole optique rigoureux, dépasse ces limites. Elle offre un champ d'investigation inédit pour l'étude non invasive des œuvres d'art, en réorientant l'attention de la surface dégradée vers la stratification picturale et la qualité d'exécution.

**Conclusion générale du chapitre**

La lumière collimatée oblique apparaît alors non pas comme un simple réglage d'éclairage, mais comme une condition déterminante de l'efficacité de la méthode L.A.M. Elle constitue un levier heuristique et épistémologique pour l'étude scientifique des peintures anciennes. Cette convergence entre théorie optique, validation expérimentale et instrumentation dédiée fonde la singularité et la puissance de la méthode, préparant directement le chapitre suivant consacré à l'analyse approfondie de la technique exécutive de *La Joconde*.

# CHAPITRE 5

## *La Joconde* : caractérisation scientifique de la technique exécutive

« *La pittura è cosa mentale*. »

Léonard de Vinci, *Trattato della pittura* (manuscrit posthume, compilé au XVI^e^ siècle)
(« *La peinture est une chose mentale.* »)

# 5 CHAPITRE 5 - *La Joconde* : caractérisation scientifique de la technique exécutive

## Introduction

L'étude présentée dans ce chapitre constitue la première analyse scientifique systématique de *La Joconde* (INV. 779, musée du Louvre) fondée sur l'imagerie multispectrale et sur l'exploitation de méthodes innovantes de traitement des données. Elle vise à caractériser, dans toute leur complexité, les éléments de la technique exécutive de Léonard de Vinci, en confrontant les résultats obtenus aux connaissances établies au début des années 2000 et aux analyses alors menées par le laboratoire des Musées de France.

Au-delà d'une simple relecture matérielle, cette approche poursuit un double objectif :

• restituer les conditions originelles d'exécution de l'œuvre, par la reconstitution de ses couleurs, de ses glacis et de ses effets optiques ;

• mettre en évidence les gestes et procédés spécifiques de Léonard, révélés grâce à la résolution spectrale et spatiale inédite de la caméra multispectrale et de la méthode L.A.M.

Les résultats dépassent largement le cadre d'une confirmation des données antérieures. Ils permettent d'identifier, de documenter et parfois de redécouvrir des pratiques picturales jusqu'alors insoupçonnées chez Léonard. Parallèlement, les techniques de traitement et d'analyse développées dans le cadre de cette recherche - telles que le dévernissage virtuel, l'identification des mélanges pigmentaires et la restitution de la saturation chromatique d'origine - ouvrent de nouvelles perspectives sur la perception visuelle du tableau au XVI$^{e}$ siècle, à l'époque de son entrée dans les collections de François I$^{er}$.

Surtout, l'imagerie révèle des traces inédites de la technique exécutive de Léonard - *spolvero*, dessins préparatoires, glacis, grattage, hachures, usage des doigts, reprises et repentirs - qui témoignent de l'extraordinaire inventivité matérielle et gestuelle de l'artiste.

Ces découvertes ne constituent pas seulement des apports empiriques : elles invitent à reconsidérer les cadres mêmes de l'analyse de la création artistique, en posant la question de la manière dont la science de l'image renouvelle nos catégories d'interprétation des pratiques picturales.

Ce chapitre propose ainsi une lecture intégrée et inédite de *La Joconde*, en articulant données historiques, résultats expérimentaux et interprétation physico-optique. En mettant en lumière la maîtrise de Léonard dans l'exploitation des propriétés de la lumière et de la matière picturale, il contribue à renouveler profondément notre compréhension de la genèse de l'œuvre, de son état matériel et de son inscription dans l'histoire de l'art et de la science.

*Figure 94* - La Joconde *ou* Monna Lisa*, musée du Louvre Paris, huile sur peuplier, 534 × 794 × 14 mm*
*Peinte entre 1503 et 1519 par Léonard de Vinci, Recto* © P. Cotte *- Verso* © Louvre

Le support de *La Joconde* se compose d'une planche de peuplier initialement estimée à une épaisseur comprise entre 30 et 40 mm. Elle a manifestement été amincie au cours d'une intervention de restauration, sans doute entreprise afin de remédier aux dégâts provoqués par des attaques xylophages et de corriger une déformation induite par le vieillissement du bois. À l'avers, une bordure périphérique de 7 à 8 mm non peinte subsiste sur les quatre côtés du panneau, témoignant de l'exécution du tableau après insertion dans un dispositif de contention. Sur cette bordure latérale, on observe également des traces de *ceruse*, couche préparatoire blanche appliquée avant la mise en peinture.

Au revers, plusieurs éléments matérialisent l'histoire matérielle et conservatoire de l'œuvre. Un papier ancien, apposé vers 1939, subsiste en périphérie ; il fut vraisemblablement ajouté lors d'un ré-encadrement. On distingue également la trace de deux pièces en forme de "papillon" insérées transversalement pour contenir une fente longitudinale : seul l'un de ces éléments est encore en place, l'autre ayant disparu, laissant une empreinte en creux plus claire dans le bois.

Différentes inscriptions et marques témoignent des pérégrinations historiques du tableau. Au centre du revers figure le numéro manuscrit "29", correspondant à l'identifiant attribué à l'œuvre lors de son transfert de Versailles vers le Louvre sous la Révolution française, le 27 messidor an V (15 juillet 1797). Cette numérotation est corroborée par son entrée officielle au musée le 25 thermidor an V (12 août 1797).

Un cachet à l'encre rouge, daté de 1810, indique l'inscription du tableau à l'inventaire du musée Napoléon (ancien nom du Louvre), sous le numéro 316. Ce tampon porte la mention "MR" pour "Musées Royaux", encadrant un motif de fleur de lys.

Une marque "H", dont la signification demeure incertaine, est visible dans la partie supérieure du panneau. Des traits horizontaux sommairement esquissés en haut et en bas de cette lettre évoquent une notation ou un repère technique, peut-être d'ordre menuisier.

Une étiquette manuscrite collée sur le revers du panneau mentionne Louis Jacques Du Rameau, Garde des Tableaux à Versailles, en charge de l'inventaire royal en 1784. Cette inscription est probablement la plus ancienne visible sur l'œuvre. Une photographie publiée en 1914 dans un périodique permet d'en restituer le libellé complet : « *Du Rameau Garde des Tableaux à Versailles, 1re pièce du Directeur* ». Elle atteste que l'amincissement de la planche signalé en 1913 par l'ébéniste-restaurateur Joseph Bouvard est antérieur à cette date.

Dans l'angle supérieur gauche du panneau, le mot « *Joconde* » est inscrit à la craie, à proximité du numéro 29, selon une graphie comparable, probablement contemporaine de cette même période.

Enfin, quatre petits chiffres, 1, 2, 3 et 4, inscrits verticalement, sont discernables sur le milieu du panneau. Ils correspondent très vraisemblablement aux emplacements des baguettes du cadre de contention utilisé pour maintenir la planéité du support lors d'une phase antérieure de conservation.

## 5.1 Technique exécutive connue en 2004 avant la numérisation multispectrale

*La Joconde*, chef-d'œuvre réalisé par Léonard de Vinci entre 1503 et 1519 (Pedretti, 1973; Arasse, 2003b; Delieuvin et Collectif, 2012; Faton, 2012; Kemp et Pallanti, 2017), est un portrait de Lisa Gherardini peint à l'huile sur un panneau de bois de peuplier de dimensions 79 cm x 53 cm (inv. n°779, Musée du Louvre). Ce tableau emblématique, inextricablement lié au Louvre et à l'histoire de l'art, se distingue par une technique picturale remarquable, conférant un réalisme saisissant qui contribue à son mythe. Le support, une planche de bois de peuplier, mesurait probablement, comme c'était souvent le cas pour les tableaux de cette époque, une épaisseur initiale comprise entre 25 et 35 mm avant d'être réduite à 14 mm lors d'une restauration visant probablement à redresser une déformation causée par le temps.

Conformément aux recommandations de Léonard, la planche était placée dans un cadre de contention destiné à stabiliser le bois et à limiter ses mouvements face aux variations de température et d'humidité (voir Figure 96). Ce cadre protecteur, essentiel à la conservation du support, a laissé des traces visibles sur les bords de la planche. Sur environ 1 cm, le bois est resté brut, enduit de colle, une pratique comparable à celle observée sur les planches de noyer utilisées pour *La Dame à l'Hermine* et *La Belle Ferronnière* (voir Figure 97).

Léonard, soucieux des propriétés physiques des matériaux, recommandait également l'utilisation de bois coupé dans la partie de l'arbre exposée au nord (voir Figure 95). Cette planche aurait nécessité un séchage préalable très long, de l'ordre de 7 à 10 ans, avant d'être préparée, possiblement par une couche de *gesso*[12], bien que cette étape ne soit pas entièrement confirmée[13], recouverte d'une ou plusieurs couches de blanc de plomb (Laval, Pagès-Camagna et Walter, 2006).

Le liant employé pour la peinture est une huile, probablement de lin ou de noix, enrichie de litharge pour accélérer le séchage. Les pigments utilisés, typiques de la Renaissance italienne, sont documentés par les écrits de Cennino Cennini (1360-†1440) (Cennini, 2012) et Giovanni Paolo Lomazzo (1538-†1592) (Lomazzo, 2019). Les analyses modernes ont permis d'identifier avec précision les matériaux employés par les élèves de Léonard dans son atelier, complétant les connaissances historiques. Ces recherches incluent des études détaillées sur les pigments (Bonizzoni et al., 2012, 2017; Matteucci et al., 2015a, 2015b, 2016), ainsi que des travaux sur les méthodes de conservation et la compréhension des techniques de Léonard (Keith, 2011; Curie, 2012; Ciatti et Frosinini, 2018).

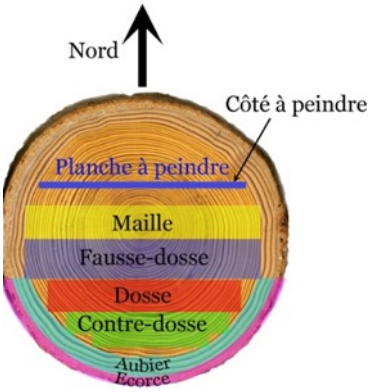



*Figure 95 - Coupe transversale d'un arbre, sections utilisées pour une planche à peindre.* © P. Cotte

*« La planche faite avec la partie de l'arbre tournée vers le nord se plie moins et garde mieux sa forme plane naturelle. La raison en est que ce côté-là le soleil n'atteint et ne déplace guère l'humeur de l'arbre ; alors que la partie méridionale est exposée tout le jour au soleil, qui, dans cette partie, entraîne le mouvement de l'humeur d'Est en Ouest, suivant sa propre course. »*
L. de Vinci. Codex Urbinas, folio 252 verso et 253 recto.

[12] Préparation à base de gypse blanc (sulfate de calcium) généralement appliquée sur des panneaux de bois avant de les peindre.

[13] Dans une étude sur *La Dame à l'Hermine* de 2015, (Czop *et al.*, 2015), il semble que Léonard n'adopte pas systématiquement la technique du *gesso-colle*. « *La préparation du fond a été identifiée comme une fine couche de blanc de plomb liée à l'huile ou à la tempera. Kozłowski remarque à juste titre que cela a une influence sur la radiographie et souligne également le caractère novateur de ce type de préparation par rapport au fond en gypse et colle (gesso) qui était populaire en Italie à cette époque.* »

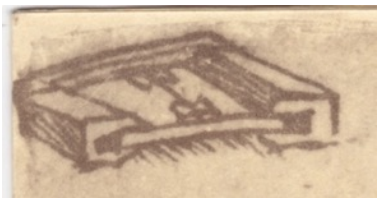


*Figure 96 - Cadre de contention pour planche à peindre - Léonard de Vinci Manuscrit A, Folio 1 recto*

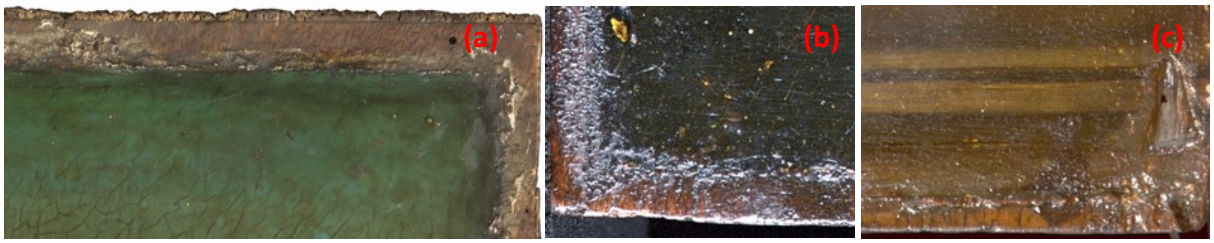



*Figure 97 - (a) Le coin supérieur gauche de la planche de* La Joconde *; (b) Le coin inférieur gauche de* La Dame à l'Hermine *(numérisée avec la caméra multispectrale en 2007) ; (c) Le coin inférieur droit de* La Belle Ferronnière *(numérisée avec la caméra multispectrale en 2011).* © P. Cotte

Parallèlement l'autre face de la planche est enduite de colle de peau, afin de compenser les tensions de surface et prévenir toute déformation future. Il semble que ces opérations aient été réalisées alors que la planche était maintenue dans le cadre de contention, ce qui expliquerait pourquoi certaines zones du bois sont restées brutes sur les bords, avec des infiltrations de blanc de plomb par endroits sous le cadre de contention (voir Figure 97).

Ces éléments soulignent la minutie et l'ingéniosité technique de Léonard, dont le processus créatif et les matériaux novateurs continuent de fasciner chercheurs et historiens de l'art.

**Formation de Léonard de Vinci**

Léonard de Vinci, fils de Ser Pietro, entre dans l'atelier (*bottega*) d'Andrea del Verrocchio à Florence vers 1466, à l'âge de 14 ans. Cet atelier, dirigé par l'un des peintres les plus éminents et renommés de Florence, est le lieu où Léonard reçoit l'essentiel de sa formation artistique initiale. Il y apprend un ensemble de savoir-faire complexes et techniques indispensables pour devenir un maître de la Renaissance.

Dans cet environnement formateur, Léonard est initié au broyage des pigments, une étape pour la préparation des couleurs. Ce processus implique le concassage des minéraux et autres substances colorantes pour obtenir des poudres fines, qui seront ensuite mélangées à des liants pour produire des peintures aux teintes riches et variées. Il apprend aussi la préparation des plantes destinées à la fabrication des laques, un travail délicat nécessitant une connaissance approfondie des végétaux et de leurs propriétés colorantes.

Léonard se familiarise avec la préparation des huiles, avec la litharge (un oxyde de plomb) utilisée principalement comme siccatif pour accélérer le temps de séchage des peintures à l'huile. Il découvre les techniques de préparation des panneaux de bois, supports aux peintures qui nécessitent un séchage prolongé, entre 7 et 10 ans, avant d'être recouverts de plusieurs couches de colle et de *gesso-colle*, pour créer une surface lisse, brillante et soyeuse au toucher.

Ces apprentissages pratiques, combinés à une immersion dans l'art du dessin et de la peinture, permettent à Léonard de développer une compréhension profonde des matériaux et des techniques de son époque. Ce n'est qu'après cette préparation que l'artiste peut commencer à peindre, appliquant les compétences et les connaissances acquises au fil de son apprentissage.

### 5.1.1 Les images scientifiques de laboratoire en 2004, analyses

Nous avons vu au chapitre 1 les images scientifiques réalisées par le laboratoire du Louvre.

Au-delà de la recherche du *spolvero*, qui constituait le point de départ introductif de cette thèse, les images scientifiques issues des examens réalisés au laboratoire du Louvre ont également nourri notre compréhension technique et historique de *La Joconde*. Bien qu'elles n'aient pas permis de localiser les *spolveri*, ces imageries ont révélé des informations précieuses sur la composition de l'œuvre et son état de conservation. Leur analyse, en dépassant le simple registre de l'observation visuelle, a contribué à poser les jalons d'une lecture approfondie et structurée de l'œuvre.

• Les images en fausses couleurs infrarouges ont révélé plusieurs interventions de restauration, notamment dans le ciel, sur la fente de la planche, et sur toute la largeur de la partie supérieure du ciel. Des retouches sont également visibles sur les montagnes à gauche et les craquelures à droite. Sur la figure de *La Joconde*, les restaurations sont perceptibles au niveau des coudes. On perçoit la reprise des doigts de la main gauche fait par Léonard, tandis que l'accoudoir montre un peu les colonnettes qui soutiennent l'appui.

• Les images infrarouges corroborent ces observations, bien que parfois avec une moindre précision, tout en offrant des détails supplémentaires, notamment sur les dessins préparatoires de la colonne à gauche et les motifs en entrelacs de la broderie bordant le décolleté. La reprise sur les doigts de la main gauche apparait avec une grande clarté, et l'accoudoir, ainsi que ses colonnettes, se distinguent plus nettement.

• Les images obtenues par fluorescence confirment également les restaurations identifiées par les techniques infrarouges et en fausses couleurs, les rendant encore plus visibles.

• Les rayons X ont, quant à eux, révélé des éléments encore plus surprenants. Selon le laboratoire du Louvre, une silhouette *comme un fantôme* apparaît, dévoilant notamment un visage tourné vers la droite, une information non signalée dans les communications officielles. Les restaurations aux coudes sont bien marquées par des traces noires bien distinctes trahissant l'absence de blanc de plomb à ces endroits, et de longues stries blanches, suivant les lignes du bois, suggèrent que la préparation du tableau pourrait avoir été réalisée uniquement avec du blanc de plomb, sans couche de *gesso-colle*.

• L'emissiographie X confirme certains éléments déjà observés avec les autres techniques. Elle met en évidence des détails sur l'épaule gauche, tout en laissant supposer d'autres éléments sans permettre de les identifier avec certitude.

Il convient de souligner que les images L.A.M. ont permis une lecture à postériori plus approfondie des mêmes images réalisées par le laboratoire du Louvre, révélant des détails qui, bien que visibles, n'ont jamais été mentionnés dans les publications officielles. Cela soulève la question des informations qui, bien que visibles, sont ignorées faute de pouvoir être interprétées. Par exemple, la limite du voile sur l'épaule gauche (*l'acciaioli da spalla*) n'a jamais été signalée, probablement en raison de son absence de sens compréhensible à l'époque en 2006.

## 5.2 Analyse des craquelures

À la suite du vol de *La Joconde* en 1911 et à son retour en France, l'authentification de l'œuvre a été réalisée par la comparaison des craquelures. Capturées en macrophotographie, ces craquelures sont

devenues comparables à des empreintes digitales. Les craquelures observées et illustrées ci-après résultent du vieillissement du blanc de plomb, de la nature de la couche picturale, du vernis et des dilatations du support en bois.

L'analyse des craquelures constitue un domaine extrêmement complexe, et de nombreux scientifiques (Bucklow, 1999), (Karpowicz, 1990) ont tenté d'aborder ce sujet sans parvenir à établir de règles générales. La majorité des thèses de doctorat actuelles sur ce sujet se concentrent sur les méthodes de détection et de classification des craquelures. Bien que les craquelures soient indésirables, elles font partie intégrante des peintures et fournissent des indices précieux pour la datation et l'authentification des œuvres. Par exemple, l'étude des craquelures (Pauchard et al., 2007) sur la série de peintures sur toile intitulée « Les Apôtres », exposée au musée Toulouse-Lautrec à Albi, a révélé que seuls deux tableaux de la série sont authentiques et attribuables à Georges de la Tour (1593-1652).

La très haute définition de la caméra permet d'examiner en détail les craquelures d'une peinture, évitant ainsi la réalisation de nombreuses et fastidieuses macrophotographies. Notre étude repose exclusivement sur la photographie multispectrale haute résolution.

*Figure 98 - Détail de l'œil de* La Joconde *à 1523 dpi - filtre 560 nm + information couleur* © P. Cotte

### 5.2.1 Le phénomène des craquelures

La formation des craquelures dans les peintures est un phénomène complexe qui résulte de la dynamique de séchage et de durcissement des couches de pigment mélangé à un liant. Au fur et à mesure que la peinture polymérise (souvent désigné par "séchage"), des éléments volatiles du liant s'évaporent, entraînant une réduction de la matière. La matière résiduelle cherche à compenser cette perte, générant des tensions de surface.

Initialement, la couche de peinture s'amincit (de moitié, ou des deux tiers), les pigments se regroupent et forment finalement un film durci. Si les tensions persistent, le comportement du film dépend de sa composition : un film très dur, comme celui constitué d'un mélange de blanc de plomb et d'huile, se fissurera en lignes droites ; en revanche, un film plus malléable, comme celui utilisant un liant à l'œuf, se déchirera en formant divers motifs. La matière oléagineuse du jaune d'œuf est en effet moins solide que l'huile, influençant la nature des craquelures.

Les réseaux de craquelures dépendent de nombreux paramètres, parmi lesquels les principaux sont la nature du liant (œuf, colle, cire ou huile), les pigments, les préparations (sous-couches) et le support (bois, toile, carton). Le vernis appliqué sur la peinture peut créer son propre réseau en interaction avec les couches sous-jacentes, mais le plus souvent, il se contente de suivre les craquelures des pigments en dessous.

Les craquelures résultent également des interactions de la peinture avec son environnement et son histoire, répondant à des lois mécaniques, physiques et chimiques[14]. Elles reflètent ainsi une réalité matérielle, relevant de la science de la rhéologie[15] appliquée aux matériaux de l'art pictural. Malgré tout, il reste difficile de prédire la forme, la direction et la densité d'un réseau de craquelures.

Parmi les contraintes mécaniques, on peut citer les contractions et dilatations du support dues à l'humidité et aux variations de température, qui durcissent la couche picturale par temps froid et la ramollissent par temps chaud. Les chocs subis par les toiles peuvent également créer des craquelures, souvent en cercles caractéristiques.

Les contraintes physiques dépendent de la teneur en matière grasse des différentes couches, de l'ordre de ces couches (gras sur maigre) et de leur nature (bitumeuse, huileuse, etc.), ainsi que du sens des coups de brosse ou du tracé des contours.

Les peintures sont également soumises à des contraintes chimiques, telles que l'action des ultraviolets, qui déstructure les composants, les interactions entre pigments, et l'évaporation d'éléments pendant le séchage. De plus, des éléments contenus dans l'air, comme l'oxygène, ou des polluants, comme le dioxyde de soufre, peuvent avoir un impact.

En classant les craquelures par type de pigment et de liant, par forme (droite, sinueuse, granuleuse, tortueuse, angulaire, etc.), par densité et par orientation, il est possible de tirer des conclusions intéressantes sur l'histoire et la composition de la peinture.

Les interventions en atelier (restaurations, rentoilages, transpositions, allégements de vernis, dévernissages et application de multiples couches de vernis de rénovation) peuvent parfois modifier ce réseau ou en créer un nouveau. Les conclusions peuvent alors devenir hasardeuses, bien que

[14] Conservation physics: Stress, strain and craquelure. https://www.conservationphysics.org/strstr/stress1.html
[15] Rhéologie : science de l'étude des mouvements (distorsion, étirement, contraction, écoulement, etc.) des matériaux (solides, visqueux, élastiques, liquides, etc.) sous l'action de phénomènes physiques (pression, gravité, température, etc.)

certaines caractéristiques, telles que celles permettant de déterminer si une peinture est à l'huile ou a tempera, restent fiables.

Les craquelures sont également très utiles pour détecter les restaurations. En effet, les réseaux de craquelures s'arrêtent souvent brusquement sur les réparations et les retouches. Un exemple notable peut être observé dans la partie supérieure du ciel de *La Joconde*, où la bande restaurée d'environ deux centimètres ne présente plus de craquelures (voir Figure 99). Cette restauration a été motivée par la nécessité de préserver l'intégrité visuelle pour remédier à une dégradation de la couche picturale. La date de l'intervention reste inconnue.

*Figure 99 - La restauration dans la partie supérieure de l'image recouvre les craquelures. (détail du ciel de* La Joconde.*)* @ P. Cotte

### 5.2.2 Les craquelures sur *La Joconde*

Pour obtenir une analyse objective, il est nécessaire de faire une classification des craquelures. C'est un exercice délicat. De nombreuses craquelures de types différents sont présentes dans une même zone : craquelures de surface, craquelures sous-jacentes, craquelures primaires, réseaux secondaires, etc. Cette étude se limitera aux craquelures principales. L'étude exhaustive de tous les types de craquelures présentes sur *La Joconde* constitue un sujet de recherche à part entière, qui mériterait un développement approfondi. Cependant l'analyse se limitera à six types de craquelures jugées représentatives et intéressantes.

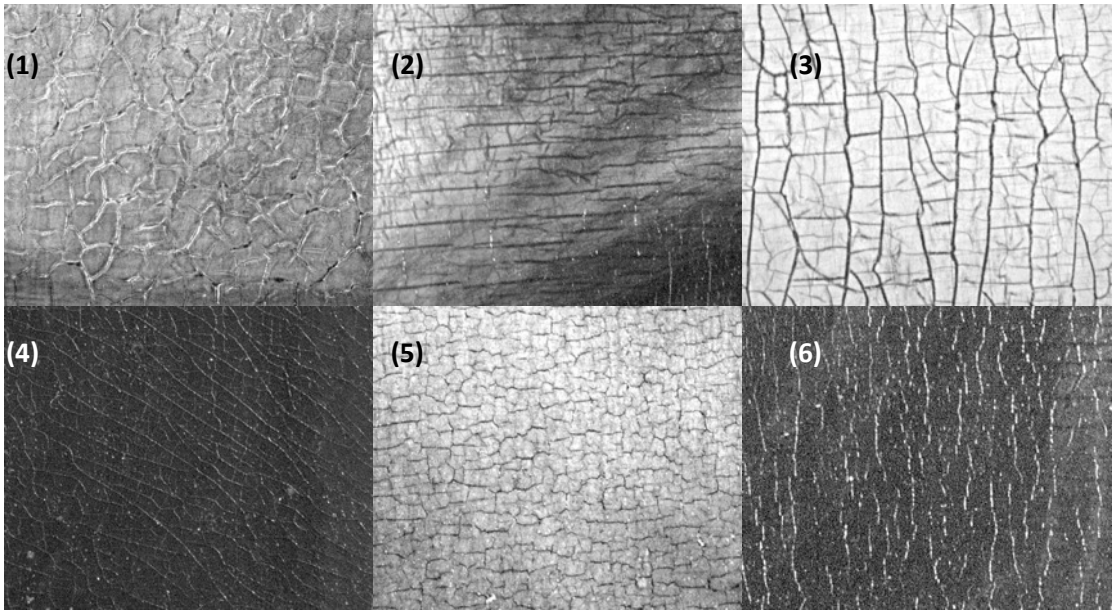



*Figure 100 - Les six principaux types de craquelures sur* La Joconde @ P. Cotte
*(1) Ciel, (2) Voile, (3) Visage, (4) accoudoir, (5) centre main droite, (6) au centre sur la robe* @ P. Cotte

(1) Des craquelures larges qui ont été comblées par de minutieuses restaurations. Elles résultent d'une sous-couche trop riche en huile. Peindre « gras sur maigre » est une règle de base en peinture, elle n'a peut-être pas été respectée parfaitement par Léonard de Vinci.
(2) Ces craquelures, probablement les plus intéressantes au regard de la chronologie de la création de la peinture, sont très superficielles et toujours horizontales. Elles apparaissent principalement dans les reprises situées dans la chevelure, à droite et à gauche du cou et du visage, ainsi que sur l'épaule. La présence d'un réseau distinct de craquelures secondaires sous la surface indique des retouches tardives, probablement réalisées plusieurs années après l'achèvement initial, permettant ainsi aux craquelures de se former. Cela est confirmé en plusieurs endroits, notamment par la restauration de l'index de la main gauche, qui présente des craquelures similaires. L'examen de ces craquelures est une preuve tangible de ces interventions postérieures.
(3) Ces motifs réguliers sont caractéristiques d'un blanc de plomb mélangé avec une huile.
(4) Craquelures superficielles de vernis à forte tension superficielle, probablement un vernis moderne.
(5) On retrouve ces petites craquelures irrégulières sur le bas du visage et sur le dos de la main droite. Elles sont inhabituelles pour un mélange qui devait très probablement contenir du blanc de plomb.
(6) Craquelures superficielles de vernis, probablement ancien.

Ces observations s'appuient sur divers travaux de recherche consacrés aux craquelures et aux pratiques de restauration (Karpowicz, 1990; Bucklow, 1997, 1999; Bohn, Pauchard et Couder, 2005; Pauchard et al., 2007; Giorgiutti-Dauphiné et Pauchard, 2016).

## 5.3 Le dévernissage virtuel de *La Joconde*

La majorité des peintures sont recouvertes d'un vernis, lequel joue plusieurs rôles essentiels. Il protège les œuvres contre les abrasions et les agressions chimiques telles que l'humidité ou la fumée de cigarette ; il harmonise la réflectivité de la surface, certaines zones étant naturellement plus brillantes en raison des propriétés des pigments ; il renforce la cohésion de la couche picturale ; il intensifie les couleurs (saturation) et accentue les contrastes. L'application d'un vernis brillant confère ainsi à la peinture une apparence plus vivante, lumineuse et éclatante. Toutefois, avec le temps, le vernis subit un phénomène de « jaunissement ». Ce phénomène complexe résulte de la photo-dégradation de la structure chimique du vernis, principalement causée par l'exposition aux ultraviolets et l'absorption de lumière accentuée par l'opacité croissante du vernis et du liant. On notera que la presque totalité des mesures (voir Figure 105) montrent une réflectance quasi nulle à 400 nm, traduisant une absorption importante des courtes longueurs d'onde par le vernis vieilli. Ce comportement spectral indique que le vernis agit comme un filtre, réduisant la luminosité des couleurs froides (bleues et violettes) tout en laissant davantage passer les couleurs chaudes, contribuant ainsi à une altération des teintes originales.

Le processus de dévernissage pendant les opérations de restauration peut parfois entraîner la suppression involontaire de certaines parties de l'œuvre. Des témoignages historiques, notamment ceux de Giorgio Vasari[16] en 1550 et de Cassiano Dal Pozzo[17] en 1625, confirment la présence initiale de cils et de sourcils dans le portrait de *La Joconde*, aujourd'hui disparus. Il est donc possible que ces détails aient été accidentellement effacés lors d'une précédente opération de réduction du vernis.

Une première méthode de dévernissage virtuel peut calculer la modification de la lumière diffusée par la peinture due au vernis. Ce dernier induit une absorption de lumière selon la loi de Beer-Lambert-Bouguer et un facteur multiplicatif réduisant les facteurs de réflectance, dépendant de la longueur d'onde (Elias et al., 2004). Il induit également un nivellement de la surface de la peinture impliquant une translation vers le bas des spectres (Elias et al., 2006). Ces propriétés physiques dépendent de la nature du vernis et de son état de dégradation. Malheureusement, aucune identification du vernis n'a été effectuée lors de la campagne de mesures et cette méthode ne peut être utilisée ici.

Plusieurs techniques de retrait virtuel du vernis ancien, jauni et sombre ont été décrites dans un article publié en 2006 (Cotte et Dupraz, 2006a). Elles ne seront donc pas réexaminées ici. La méthode pseudo-inverse, qui sera décrite plus loin, n'avait pas été abordée dans cet article, en raison de l'absence à l'époque d'une base de données de pigments correspondant à la période de Léonard de Vinci, nécessaire à l'élaboration du modèle requis.

Cette thèse propose une méthode novatrice pour réaliser un dévernissage virtuel. Cette technique ne cherche pas à restaurer les couleurs originales de l'œuvre, altérées par le temps, mais vise à simuler les effets d'un retrait physique du vernis, tel qu'il pourrait être réalisé dans un atelier de restauration. L'objectif principal de ce dévernissage virtuel est de faciliter l'identification des pigments par d'autres logiciels de traitement, une tâche compliquée par la présence du vieux vernis jauni. Bien que les

[16] Les sourcils, faits de telle sorte que l'on voyait la façon dont les poils sortent de la peau, ici plus touffus et là plus clairsemés, et orientés suivant les pores de la peau, ne pouvaient être plus naturels.
« *Le ciglia per avervi fatto il modo del nascere i peli nella carne, dove più folti e dove più radi, e girare secondo i pori della carne, non potevano essere più naturali.* »

[17] Notons qu'à cette dame par ailleurs très belle il manque quelques peu de cils que le peintre ne lui a pas fait apparaitre, comme si elle ne devait pas en avoir.
« *Notamo che a quella donna, per altro bella, mancava qualche poco nel ciglio, che il pittore non gliel'ha fatto molto apparire, come che essa non doveva haverlo.* »

couleurs obtenues soient plus réalistes après ce processus (le ciel n'apparaît plus vert, comme le montre la Figure 102), il est important de noter que l'huile utilisée comme liant pour les pigments a également jauni avec le temps. Ainsi, les couleurs ravivées ne correspondent pas exactement aux teintes originales appliquées par Léonard de Vinci, mais offrent une version rafraîchie de l'œuvre, reflétant davantage l'impact visuel d'une éventuelle restauration.

### 5.3.1 Dévernissage par méthode pseudo-inverse

Les méthodes indirectes permettent de reconstruire un spectre en utilisant des modélisations mathématiques ou des transformations qui infèrent les données manquantes à partir des données existantes, tout en incorporant des connaissances *a priori* ou en appliquant des transformations spécifiques. Ces méthodes nécessitent une phase d' "apprentissage" basée sur des mesures préalables effectuées sur des échantillons. L'utilisation de cette approche est particulièrement adaptée au dévernissage virtuel des œuvres d'art.

**• Pseudo-inverse :**

La méthode pseudo-Inverse, ou la méthode de Moore-Penrose (Moore, 1920), (Penrose, 1955), est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations linéaires. C'est une technique fondamentale en traitement d'images, notamment dans le contexte des caméras multispectrales. Cette méthode exploite les propriétés des matrices pour modéliser le vieillissement du vernis comme un ensemble de paramètres à inverser.
Pour bien comprendre cette méthode, utilisée ici dans un contexte quelque peu atypique, il convient de considérer les éléments suivants :

**• Mesures des pigments sans vernis :**

Les mesures réalisées avec un spectrophotomètre sur des pigments non vernis constituent la matrice $R$. Le spectrophotomètre fournit 30 mesures, une tous les 10 nm, de 400 à 700 nm. Ainsi, la matrice $R$ comporte 30 lignes par pigment mesuré.

**• Mesures des mêmes pigments avec vernis :**

Les mesures réalisées avec la caméra multispectrale sur ces mêmes pigments, mais vernis, forment la matrice $C$ . La caméra fournit 9 mesures dans le domaine visible. La matrice $C$ comporte donc 9 lignes par pigment mesuré. Cette matrice a généralement une dimension inférieure à celle de $R$ car la caméra capture moins de bandes spectrales que le spectrophotomètre, mais elles partagent le même nombre de pigments mesurés.

Estimation du spectre indirect :

$$\Theta_{indirecte} = R \cdot C^T (C \cdot C^T)^{-1} \qquad \textit{Eq. ( 16 )}$$

Cette formule est utilisée pour estimer les spectres des pigments sans vernis en se basant sur les données fournies par la caméra multispectrale.

- $C^T$ : Transposée de $C$.
- $(C \cdot C^T) - 1$ : Inverse de la matrice produit $C \cdot C^T$, ce qui permet de "neutraliser" les effets combinés des réponses de la caméra.
- $R \cdot C^T$ : Ce produit matriciel ajuste les mesures spectrophotométriques $R$ en fonction de la réponse transposée de la caméra $C^T$, alignant les dimensions pour le calcul final.
- $\Theta_{indirecte}$ : Produit une estimation du spectre « sans vernis » basée sur les données capturées par la caméra multispectrale. Ce calcul permet de projeter les réponses de la caméra dans l'espace des mesures du spectrophotomètre, produisant ainsi une estimation des spectres sans vernis.

En pratique, chaque pixel de l'image multispectrale fournit 9 mesures (correspondant aux 9 bandes spectrales de la caméra) qui sont multipliées par la matrice $\Theta_{indirecte}$. Ce calcul permet d'estimer les 30 valeurs du spectre correspondant à un pigment « sans vernis », comme si le vernis avait été retiré. Cette méthode est avantageuse car elle ne nécessite aucun ajustement de paramètres supplémentaires et produit un résultat directement utilisable.

### 5.3.2 Élaboration de la base de données de pigments pour le dévernissage virtuel

Des pigments disponibles à l'époque de Léonard de Vinci ont été appliqués sur une planche préparée avec du blanc de plomb et un liant alkyd (voir Figure 101). Chaque plage de couleur est divisée verticalement en trois bandes : à gauche (bande étroite), la couleur est diluée avec du liant alkyd ; au centre (bande large), la couleur est en ton plein ; à droite (bande étroite), la couleur est mélangée avec du blanc de plomb. Horizontalement, une bande de résine artificiellement vieillie a été partiellement appliquée sur ces pigments, de sorte qu'une partie soit vernie et l'autre non vernie.

**Discussion sur le choix d'un liant alkyd**

Le choix d'un liant alkyd plutôt que d'une huile de lin ou de noix s'explique par l'incertitude quant au type exact d'huile utilisé par Léonard de Vinci, ainsi que par l'absence d'informations sur l'influence potentielle de son siccatif, qui pourrait être de la litharge. L'indice de réfraction des huiles vieillies et durcies augmente de n≈1.5 à n≈1.6, (O'Hanlon, 2024), ce phénomène rapproche l'indice de réfraction des pigments de celui de l'huile, ce qui exerce une influence significative sur la perception de la couleur des pigments et sur leur opalescence. Ce phénomène est perceptible sur *La Joconde*, où le pied de la colonne à droite est désormais quasiment transparent. En outre, l'huile vieillie développe une teinte jaunâtre, tandis que la plupart des pigments minéraux d'origine conservent leur stabilité sur des périodes de plusieurs siècles, dont le lapis lazuli. (Siddall, 2018) Ainsi, l'utilisation d'un liant neutre était préférable afin d'éviter d'introduire une variable aléatoire associée à une huile dont la composition exacte, le siccatif et l'état de vieillissement demeurent inconnus.

**Discussion sur le choix du vernis**

De même, pour le vernis vieilli, on ne connait pas la nature des différentes couches de vernis recouvrant *La Joconde*, qui a fait l'objet de nombreuses opérations de restauration successives au cours des siècles (Mohen, 2006). Le choix d'une résine classique vieillie artificiellement est donc tout indiqué, d'autant plus qu'il a été démontré que l'indice de réfraction des vernis n'a que peu d'influence (Berns et de la Rie, 2003). L'objectif de ce dévernissage virtuel est avant tout de réduire l'influence d'un vieux vernis jauni sur le spectre de réflexion diffuse de la lumière sur un pigment. Cette base de données de mesures représente un compromis et permet son utilisation pour d'autres peintres à d'autres périodes rapprochées de l'histoire.

La liste des pigments utilisée pour l'apprentissage du dévernissage, étudiée dans le cadre d'une recherche en anglais, comprend : *white lead ; lead-tin-yellow I ; naples yellow hell ; lead-tin-yellow II ; weld lake (Reseda luteola) (arzica) ; brown pinke lake (stil-de-grain) ; yellow ochre ; limonite (goethite) yellow ; haematite ; red ochre ; minium ; mercury vermilion ; dragon's blood ; madder lake ; brazilwood lake ; lac dye ; smalt ; natural ultramarine ; natural indigo ; azurite ; blue verditer ; verdigris ; malachite ; green verditer ; copper resinate ; verona green earth ; raw umber earth ; burnt umber earth ; asphaltum ; charcoal black ; ivory black ; lamp black.*

Afin d'éviter toute confusion avec les publications associées, les noms des pigments ont été maintenus en anglais.

*Figure 101 - Tableau de pigments anciens utilisés à la Renaissance avec et sans vernis vieilli réalisé avec F. Perego*

### Élaboration de la matrice de dévernissage

Le tableau (Figure 101) de pigments anciens appartenant à la palette de Léonard de Vinci a été mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre et de la caméra multispectrale. Pour chacun des 32 pigments, 18 mesures - 9 avec vernis vieilli et 9 sans - ont été réalisées pour constituer la matrice d'apprentissage dans la plage de 400 à 700 nm. À partir de ces **576** mesures (32 x 9 + 32 x9), la matrice finale (voir Tableau 8) relève les corrections négatives (rouges entre parenthèses) les plus significatives dans la colonne des 400 nm, ainsi que des valeurs négatives réparties sur l'ensemble de la matrice. Cela confirme la pertinence de cette méthode qui prend en compte les phénomènes complexes d'interaction entre la lumière, le vernis et les pigments, permettant ainsi de supprimer efficacement l'influence du vernis vieilli.

| | 400 nm | 440 nm | 480 nm | 520 nm | 560 nm | 600 nm | 640 nm | 680 nm | 720 nm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 400nm | (2,119716736) | 3,546926589 | (1,091463341) | 0,471654100 | (0,312045848) | 0,412146145 | (0,713232584) | 0,392648357 | 0,050775910 |
| 410nm | (2,313883941) | 3,591361189 | (0,965926545) | 0,426515194 | (0,292837048) | 0,388780859 | (0,68024096) | 0,372657329 | 0,048279595 |
| 420nm | (2,702218350) | 3,680230391 | (0,714852952) | 0,336237381 | (0,254419448) | 0,342050286 | (0,614257722) | 0,332675274 | 0,043286964 |
| 430nm | (2,86699584) | 3,71721269 | (0,607733568) | 0,297701986 | (0,237994347) | 0,32206331 | (0,586005108) | 0,315565192 | 0,041149987 |
| 440nm | (3,04997764) | 3,765695130 | (0,494741699) | 0,257244765 | (0,221018103) | 0,301483942 | (0,557230451) | 0,298044075 | 0,038965873 |
| 450nm | (3,26214773) | 3,816044110 | (0,359008081) | 0,208485825 | (0,200334043) | 0,276343286 | (0,521809016) | 0,276557571 | 0,036283825 |
| 460nm | (2,98240279) | 3,156569444 | 0,064781128 | 0,155279990 | (0,170728201) | 0,232543970 | (0,460437922) | 0,249052623 | 0,029286444 |
| 470nm | (2,07178007) | 1,626502251 | 0,815162705 | 0,102902838 | (0,132636251) | 0,168959178 | (0,371095883) | 0,216360702 | 0,01737192 |
| 480nm | (1,163491759) | 0,100173781 | 1,563870307 | 0,050658385 | (0,09464653) | 0,105539832 | (0,281999527) | 0,183766652 | 0,005486976 |
| 490nm | (0,788235016) | (0,360660177) | 1,463113613 | 0,312733713 | (0,094123715) | 0,064808540 | (0,232772533) | 0,162065126 | 0,005632436 |
| 500nm | (0,519096126) | (0,553993717) | 1,090548436 | 0,703656599 | (0,114025324) | 0,029278808 | (0,193809028) | 0,143506335 | 0,009426406 |
| 510nm | (0,327871705) | (0,606305409) | 0,652916010 | 1,054289271 | (0,099791105) | (0,0021412) | (0,160233044) | 0,125725464 | 0,014759503 |
| 520nm | (0,185509777) | (0,644313619) | 0,355659585 | 1,196077929 | 0,003173174 | (0,030640878) | (0,126994520) | 0,106253219 | 0,019527494 |
| 530nm | (0,116077703) | (0,657894374) | 0,249955555 | 1,023868077 | 0,278787971 | (0,077217456) | (0,09786393) | 0,086246146 | 0,023784862 |
| 540nm | (0,124105454) | (0,591982980) | 0,226628050 | 0,644095248 | 0,674273711 | (0,134151289) | (0,073501365) | 0,066128706 | 0,028377814 |
| 550nm | (0,151971197) | (0,511929597) | 0,252393343 | 0,215830032 | 1,040651149 | (0,160104499) | (0,045055646) | 0,043109420 | 0,03259220 |
| 560nm | (0,142158850) | (0,482772752) | 0,294014001 | (0,105065455) | 1,232477227 | (0,114092232) | (0,003438981) | 0,014215309 | 0,035765135 |
| 570nm | (0,067633148) | (0,537517839) | 0,368844302 | (0,288086309) | 1,158606755 | 0,074621953 | 0,040568694 | (0,026772227) | 0,037177602 |
| 580nm | 0,036708201 | (0,637003150) | 0,486271817 | (0,412627427) | 0,916212091 | 0,363835575 | 0,086454942 | (0,07638634) | 0,037421915 |
| 590nm | 0,137714772 | (0,733282170) | 0,598863251 | (0,489197030) | 0,628871665 | 0,628276930 | 0,159353460 | (0,123699824) | 0,037442113 |

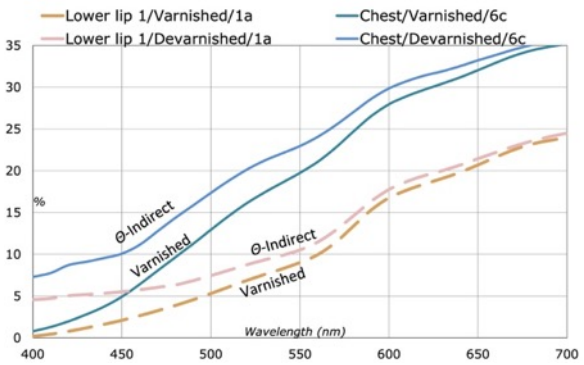
| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 600nm | 0,20168774 | (0,774881395) | 0,656351222 | (0,52591280) | 0,416561002 | 0,739872324 | 0,283764025 | (0,157234626) | 0,0379957 |
| 610nm | 0,214436502 | (0,739179373) | 0,635363352 | (0,505470293) | 0,309530257 | 0,616967565 | 0,524097807 | (0,193175689) | 0,03919768 |
| 620nm | 0,195971128 | (0,657227347) | 0,566625458 | (0,430456073) | 0,244101299 | 0,344130381 | 0,849155249 | (0,23152625) | 0,040710716 |
| 630nm | 0,162936171 | (0,557388565) | 0,480122027 | (0,338345614) | 0,202466060 | 0,042433072 | 1,135473460 | (0,235589470) | 0,042559383 |
| 640nm | 0,133581738 | (0,473492013) | 0,410547699 | (0,270164115) | 0,168904483 | (0,164444300) | 1,266947920 | (0,170509365) | 0,045119353 |
| 650nm | 0,108146990 | (0,407895271) | 0,362467977 | (0,235783246) | 0,14679644 | (0,239685152) | 1,157218440 | 0,036454930 | 0,02540463 |
| 660nm | 0,07857420 | (0,345117308) | 0,319196860 | (0,21392940) | 0,142139845 | (0,249550330) | 0,886172110 | 0,344750145 | (0,009034469) |
| 670nm | 0,049522292 | (0,288695961) | 0,280633466 | (0,196661934) | 0,141836124 | (0,228037884) | 0,583161894 | 0,623150702 | (0,012414349) |
| 680nm | 0,025110460 | (0,240051841) | 0,244773280 | (0,174795662) | 0,132001187 | (0,207774482) | 0,371596662 | 0,739729637 | 0,060963345 |
| 690nm | 0,018261983 | (0,212006772) | 0,22075548 | (0,152388101) | 0,111704950 | (0,188353966) | 0,275477293 | 0,631563240 | 0,251740256 |
| 700nm | 0,02275668 | (0,199154784) | 0,20594236 | (0,131826562) | 0,087176992 | (0,155004127) | 0,230825154 | 0,377149513 | 0,526326231 |

*Tableau 8 - Exemple de matrice de dévernissage.*

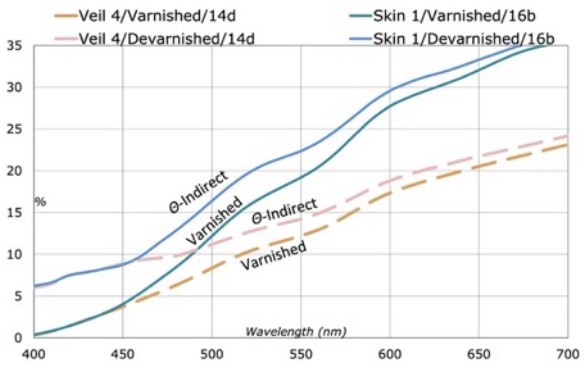
### Application sur *La Joconde* de la méthode pseudo-inverse de dévernissage

Pour effectuer le dévernissage virtuel de *La Joconde* (voir Figure 102), il faut multiplier la matrice calculée par toutes les mesures de la caméra pour chaque pixel, afin d'obtenir les spectres « sans vernis vieilli ». Ces spectres ainsi obtenus facilitent l'identification des pigments en éliminant l'effet du vernis sombre et jauni. Les exemples de spectres vernis/dévernis (voir Graphs n°7 et 8 Figure 103) montrent l'influence du vernis jauni : par exemple, le spectre (Graph n° 8) du ciel au point 52a (voir emplacement sur *La Joconde* Figure 104) avec vernis (courbe verte) présente une longueur d'onde dominante de 520 nm perçue comme verte, tandis qu'en l'absence de vernis (courbe bleue), la longueur d'onde dominante est de 470-480 nm perçue comme bleue. Pour le ton de la peau, le spectre (Graph n° 1) au point 6c avec vernis (courbe orange) apparaît jaune/orange en raison de l'absence de bleu, alors qu'en l'absence de vernis (courbe rose), les radiations vertes et bleues donnent une teinte rose.

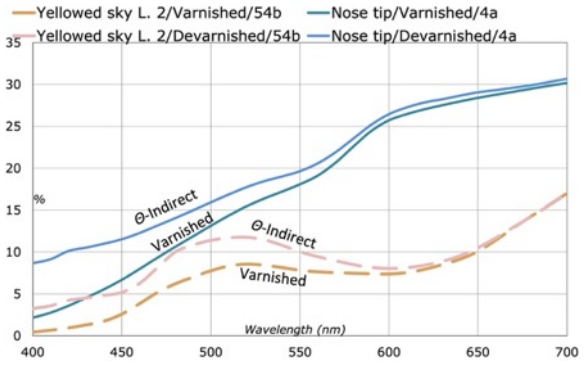
*Figure 102* - La Joconde *couleurs D65 (lumière du jour standard) (←)* - La Joconde *après dévernissage virtuel (→)* © P. Cotte



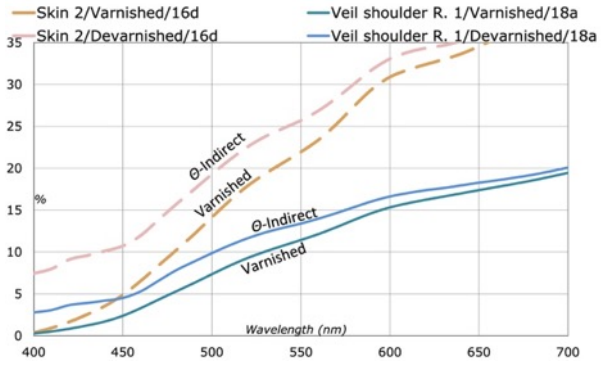

Graph n°1



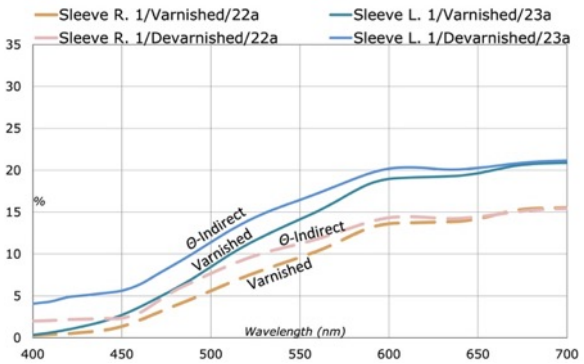

Graph n°2



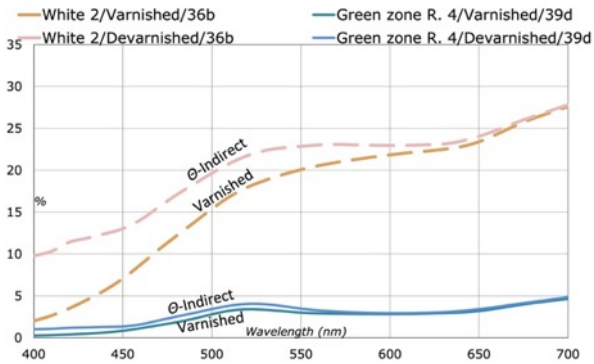

Graph n°3



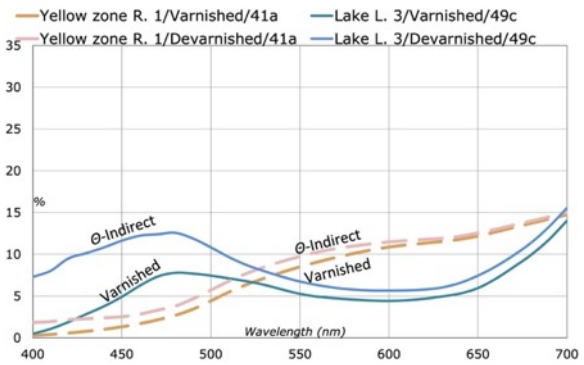

Graph n°4



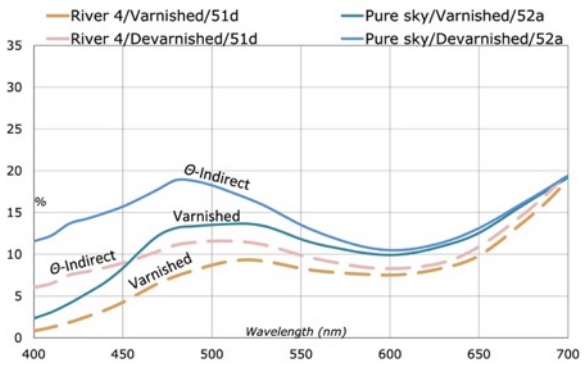

Graph n°5




Graph n°6




Graph n°7




Graph n°8

*Figure 103 - Exemples de spectres vernis/dévernis pris sur* La Joconde

## 5.4 Identification des pigments, méthodes, état de l'art

L'identification des pigments dans une peinture dépasse largement l'intérêt purement esthétique pour s'inscrire au cœur de l'histoire, de la science et de la conservation de l'art. En analysant les pigments, on peut non seulement obtenir des informations sur la provenance et la datation d'une œuvre, mais aussi décrypter les techniques et les matériaux utilisés par l'artiste. Cela offre une perspective précieuse sur les pratiques et techniques artistiques dans les contextes culturels de l'époque. De plus, cette identification intervient dans la restauration et la préservation des œuvres d'art, permettant de sélectionner les traitements les plus appropriés pour prévenir la dégradation et restaurer les peintures de manière authentique et respectueuse de leur intégrité historique. L'étude des pigments contribue également à la détection des contrefaçons, garantissant ainsi l'authenticité et la valeur des œuvres d'art. En somme, l'analyse des pigments enrichit notre compréhension et notre appréciation du patrimoine culturel mondial.

**Les méthodes traditionnelles d'analyses des pigments**

Actuellement, l'analyse des matériaux colorants dans les peintures repose principalement sur les techniques de spectroscopie moléculaire (Raman, IR, XRD), qui permettent d'identifier de manière précise les composés responsables de la couleur (Pinna, Galeotti et Mazzeo, 2010; Perez-Rodriguez et al., 2014). La spectroscopie Raman est particulièrement performante, la plupart des pigments et colorants présentant un spectre caractéristique. Les techniques spectroscopiques élémentaires (XRF, PIXE, SEM-EDS) procèdent quant à elles par la détection d'éléments-clés ; elles peuvent mener à une identification fiable, mais restent parfois insuffisantes pour conclure de manière définitive. Les méthodes chromatographiques, en particulier le couplage GC-MS, sont utiles pour caractériser les colorants organiques et les liants, mais beaucoup moins adaptées aux pigments. Enfin, l'analyse isotopique peut être mobilisée pour retracer l'origine géologique de certains pigments, notamment ceux à base de plomb.

La spectroscopie moléculaire (Raman, IR) permet de déterminer la composition chimique d'un matériau en étudiant les vibrations de ses liaisons. La diffraction des rayons X (XRD) fournit quant à elle des informations sur la structure cristalline et permet d'identifier les phases minérales.
Les méthodes de spectroscopie élémentaire (XRF, PIXE, SEM-EDS) permettent d'identifier les éléments présents dans un matériau. La fluorescence des rayons X (XRF) et l'émission induite par particules (PIXE) reposent sur l'analyse des rayons X émis par les atomes, tandis que la microscopie électronique à balayage couplée à l'EDS (SEM-EDS) combine imagerie et analyse élémentaire locale.
Chromatographie (GC-MS) : La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) est une technique de séparation et d'identification des composés volatils et semi-volatils. Elle est largement utilisée pour l'étude des liants organiques des peintures, permettant une caractérisation précise de leur composition moléculaire.
L'analyse isotopique consiste à mesurer les rapports entre isotopes stables d'un élément. Elle est particulièrement utile pour tracer l'origine géologique de certains pigments minéraux, notamment ceux à base de plomb, dont la signature isotopique permet d'identifier la provenance des gisements.

**Les limites des méthodes d'analyses non invasives des pigments**

Les méthodes non invasives appliquées in situ, telles que la spectroscopie Raman et la fluorescence X (XRF), offrent l'avantage de ne pas nécessiter de prélèvement, ce qui les rend particulièrement appréciées dans les musées. Néanmoins, elles présentent des limites importantes : incapacité à identifier l'ensemble des pigments, difficulté à quantifier les proportions dans un mélange, et impossibilité de discriminer des couches superposées. Dès lors, il reste souvent impossible de déterminer si les éléments détectés appartiennent à la surface ou aux strates profondes de la couche picturale. Dans certains cas, le recours à des analyses invasives reste nécessaire, mais celles-ci rencontrent la réticence des conservateurs, créant une véritable lacune méthodologique dans l'étude des peintures.

**Identification des pigments par spectrophotométrie**

L'identification des pigments par spectrophotométrie de lumière diffuse (350-1000 nm) a été développée avec la *Fiber Optics Reflectance Spectroscopy* (FORS), (Dupuis, Elias et Simonot, 2002) (Picollo et al., 2000) suivie de l'utilisation de caméras multispectrales (Cosentino, 2014) (Pelagotti et al., 2008) et hyperspectrales (Cucci, Delaney et Picollo, 2016; Balas et al., 2018). Une première tentative d'identification des pigments de *La Joconde* utilisant l'analyse par FORS a été réalisée en 2005, mais s'est rapidement heurtée à la vieille couche de vernis opaque et jaunissante qui recouvre l'œuvre. L'étude a néanmoins pu identifier deux pigments des tons de chair du visage : le blanc de plomb et le vermillon de mercure.

Les dernières avancées scientifiques exploitent l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) avec des caméras couvrant une plage de longueurs d'onde de 2000 à 3500 nm (Delaney et al., 2005). Bien que ces méthodes permettent d'identifier des pigments purs et appliqués en couches épaisses, les mélanges de pigments et les nombreuses couches très fines superposées dans les œuvres d'art compliquent souvent les interprétations, rendant les résultats incertains. Comme il a été vu (voir § 1.3.1 page 13), plus la longueur d'onde des infrarouges est grande, plus ils se diffusent dans la couche picturale. En conséquence, les méthodes d'identification utilisant cette partie du spectre ne sont pas toujours appropriées. Les rayons infrarouges se diffusent profondément dans la couche picturale, ne donnant qu'une mesure qui reflète la lumière diffusée en profondeur jusqu'à la couche préparatoire (*gesso*) (Cucci et al., 2019) ou les versions antérieures de l'œuvre (repeints), mais pas toujours les pigments présents en surface.

### 5.4.1 Identification des mélanges de pigments sur *La Joconde* avec la caméra multispectrale

L'identification des pigments dans *La Joconde* pose des défis spécifiques en raison des techniques sophistiquées employées par Léonard de Vinci. En effet, Léonard a utilisé des sous-couches de pigments colorés, appelées *imprimaturi*, et a apporté de nombreuses modifications, retouches et corrections, superposant ainsi plusieurs couches de peinture d'épaisseur micrométrique (Viguerie et al., 2010). Pour ces raisons, il est préférable de se concentrer sur la spectrophotométrie, en évitant le recours aux infrarouges.

Cette thèse propose non seulement d'identifier les pigments présents dans *La Joconde*, mais aussi de déterminer les mélanges de pigments et d'estimer leurs proportions grâce à une approche novatrice. La méthode inclut la correction préalable des 173 spectres mesurés sur *La Joconde* pour éliminer l'influence du vernis jauni, en utilisant la technique de pseudo-inversion expliquée précédemment. Cela permet d'obtenir des spectres dévernis, qui serviront de référence pour l'identification des pigments.

La méthode exploite un logiciel de formulation, Colibri™, qui utilise une base de données de valeurs K/S pour analyser et décomposer les mélanges de pigments. Cette approche de rétro-ingénierie permet d'identifier les mélanges et d'estimer leurs proportions. Enfin, les résultats obtenus par spectrophotométrie sont confrontés à ceux issus de techniques complémentaires telles que l'analyse en fluorescence X et la spectroscopie Raman, (Laval, Pagès-Camagna et Walter, 2006), ainsi qu'à une approche comparative de l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS).

Comparée aux études antérieures, cette recherche présente un avantage significatif grâce au grand nombre de mesures, qui réduit statistiquement la probabilité. La répétition des mesures en différents points de la peinture et l'augmentation de la densité des données permettent une analyse plus robuste et détaillée, améliorant la compréhension des caractéristiques des pigments étudiés. Cette approche méthodologique, combinant correction spectrale, rétro-ingénierie et validation par des techniques complémentaires, renforce la validité des conclusions.

### 5.4.2 Les matériaux de *La Joconde* et de Léonard de Vinci

**Pigments mentionnés par Léonard**

Parmi ses notes, codex et carnets[18], Léonard mentionne plusieurs pigments par un nom explicite *(ital)*. ('VI The Artist's materials', Richter 1883) (Vinci et Chastel, 2003) (Leonardo, Mc Mahon 1956) :

**Blancs**

**Blanc de plomb -** {*C.A. 70b ; 207b*} *Biacca* : C'est un pigment blanc à base de plomb très utilisé dans la peinture ancienne. Il était apprécié pour sa couverture et sa capacité à donner de la luminosité aux couleurs.

**Blanc de craie -** {*F. 96a et F96b*} *Calcio* : Ce pigment blanc était utilisé pour le dessin préparatoire et parfois mélangé à d'autres pigments pour des effets subtils.

**Jaunes**

**Réalgar -** {*C.A. 70b ; 207b*} *Risagallo* : Un sulfure d'arsenic rouge-orange, souvent utilisé dans l'antiquité. Il était prisé pour sa couleur vibrante, bien que toxique.

**Orpiment -** {*C.A. 70b ; 207b*} *Sorbimēto* : Un autre pigment à base de sulfure d'arsenic, de couleur jaune vif, utilisé depuis l'antiquité. Comme le réalgar, il est toxique, mais fournissait une couleur intense.

**Orpimeto -** {*F. 96a et F96b*} *Opimēto* : Identique à *sorbimēto*, c'est un pigment jaune vif toxique, précieux pour ses propriétés colorantes.

**Ocre jaune -** {*C.A. 258a ; 784a*} *Oquria* : Un pigment naturel à base d'argile contenant des oxydes de fer, donnant un jaune terreux. Il était apprécié pour sa stabilité et son caractère non toxique.

**Terre d'ombre brûlée -** {*C.A. 258a ; 784a*} *Oquria arsa* : Un pigment brun obtenu en chauffant de l'ombre naturelle, utilisé pour les ombres et les tons de terre, offrant une profondeur riche.

**Rouges**

**Hématite -** {*C.A. 258a ; 784a*} *Mattita* : Un oxyde de fer rougeâtre, souvent utilisé pour les ombres et les tons de peau, en raison de sa teinte chaude et de sa résistance.

**Cinabre -** {*C.A. 258a ; 784a*} *Cinabrese* : Un sulfure de mercure rouge vif, utilisé depuis l'antiquité. Ce pigment est toxique mais offre un rouge éclatant.

**Vermillon -** {*C.A. 258a ; 784a*} *Minio* : Une autre forme de sulfure de mercure, très similaire au cinabre, mais souvent plus finement broyé pour des applications détaillées.

**Bleus**

**Azurite -** {*F. 96a et F96b*} *Azzuro* : Un bleu intense tiré du carbonate de cuivre. L'azurite était couramment utilisée pour peindre les cieux et les robes.

**Outremer -** {*F. 96a et F96b*} *Oltramarina* : Le pigment bleu le plus précieux à l'époque, extrait du lapis-lazuli. Il était symboliquement associé au sacré et utilisé pour les éléments les plus importants de l'œuvre.

**Verts**

**Terre verte brûlée -** {*L. 92a*} *Verde terra bruciata* : Un pigment terreux vert foncé, chauffé pour intensifier sa couleur, utilisé pour les tons plus sombres de la végétation et les ombres.

**Verdigris -** {*C.U. 68r*} *Verde rame* : Un pigment vert à base de cuivre, formé par l'oxydation de ce métal. Très utilisé dans les arts, mais instable et sujet à noircir avec le temps.

**Noir**

[18] F. = notebook «F », Institut de France ; L. = notebook «L », Institut de France ; S. K. M. II1 = Codex Forster ; C.U. = Codex Urbina; C. A . = Codex Atlanticus

**Noir de fumée -** {*C.A. 71b ; 209b*} *Fumo de cādela* : Un noir de fumée obtenu par la combustion incomplète d'huile ou de résine, souvent utilisé pour les ombres et les contours en raison de sa profondeur de teinte.

Léonard ne mentionne aucune laque ou pigments organiques, toutefois il ne pouvait pas ignorer les laques de gaude (*Reseda luteola*) et de stil-de-grain, des plantes cultivées en Toscane autour de Florence et très utilisées pour leur intensité colorante (Casoli, Darecchio et Sarritzu, 2009). Cette information est déterminante pour la constitution de la base de données de pigments.

**Additifs mentionnés par Léonard**

Parfois, il mélange ces pigments avec des additifs pour colorer, saturer, éclaircir ou assombrir :

**Curcuma -** {*C.A. 258a ; 784a et F. 96b*} *Curcuma* : Utilisé principalement pour colorer, il donne un jaune brillant mais peu durable. Plus souvent employé en tant qu'additif que comme pigment principal.

**Safran -** {*C.A. 258a ; 784a et F. 96b*} *Zafferano* : Bien que précieux, le safran était utilisé pour sa teinte jaune dorée. Cependant, sa faible stabilité limitait son usage.

**Bitume -** {*C.A. 258a ; 784a et F. 96b*} *Mūmia* : Une substance noire dérivée du bitume, utilisée pour des effets de transparence et de profondeur, mais également comme un assombrisseur pour les pigments.

**Noix de galle -** {*C.A. 258a ; 784a et F. 96b*} *Fiele* : Utilisées comme mordant, ces noix de galle servaient à préparer les surfaces ou à modifier l'acidité des peintures.

**Aloès -** {*C.A. 258a ; 784a et F. 96b*} *Aloe* : Employée pour ses propriétés de saturation, cette résine pouvait être utilisée pour assombrir ou modifier la teinte des pigments.

**Aloès caballin -** {*C.U. 68r*} *Aole camellino* : Un type spécifique d'aloès utilisé pour assombrir les couleurs et pour ses propriétés liantes que Léonard recommandait pour embellir le verdigris (voir § 5.4.5, page 135)

**Jus de citron -** {*S. K. M. II1. 95a*} *Sugo di limo* : Utilisé pour éclaircir les pigments ou les modifier légèrement, le jus de citron servait parfois aussi à nettoyer les pinceaux ou les surfaces.

### 5.4.3 Construction de la carte des points de mesures sur *La Joconde*

Pour assurer une présentation des résultats à la fois pertinente et réaliste, les points de mesure sur *La Joconde* ont été sélectionnés selon les critères suivants :

i. Les points semblant correspondre à la même composition ou au même sujet ont été regroupés sous un même numéro.
ii. Les points ont été choisis en évitant les zones de restauration identifiées à l'aide d'imageries infrarouge, UV, et IR en fausses couleurs, afin de cibler uniquement les pigments d'origine.
iii. Les points de mesure ont été sélectionnés en évitant les principales zones de craquelures.

• Les mesures ont été effectuées sur la moyenne d'une matrice de 3 x 3 pixels (soit 9 pixels) afin d'augmenter la fiabilité des résultats et de réduire l'influence des micro-craquelures.

• La taille des pixels est de 68 µm² (372 dpi), la matrice d'analyse ayant ainsi une superficie de 0,2 mm².

• Les spectres ont été reconstruits en utilisant la méthode PCHIP (voir § 6.5.2, page-sup. - 47 -).

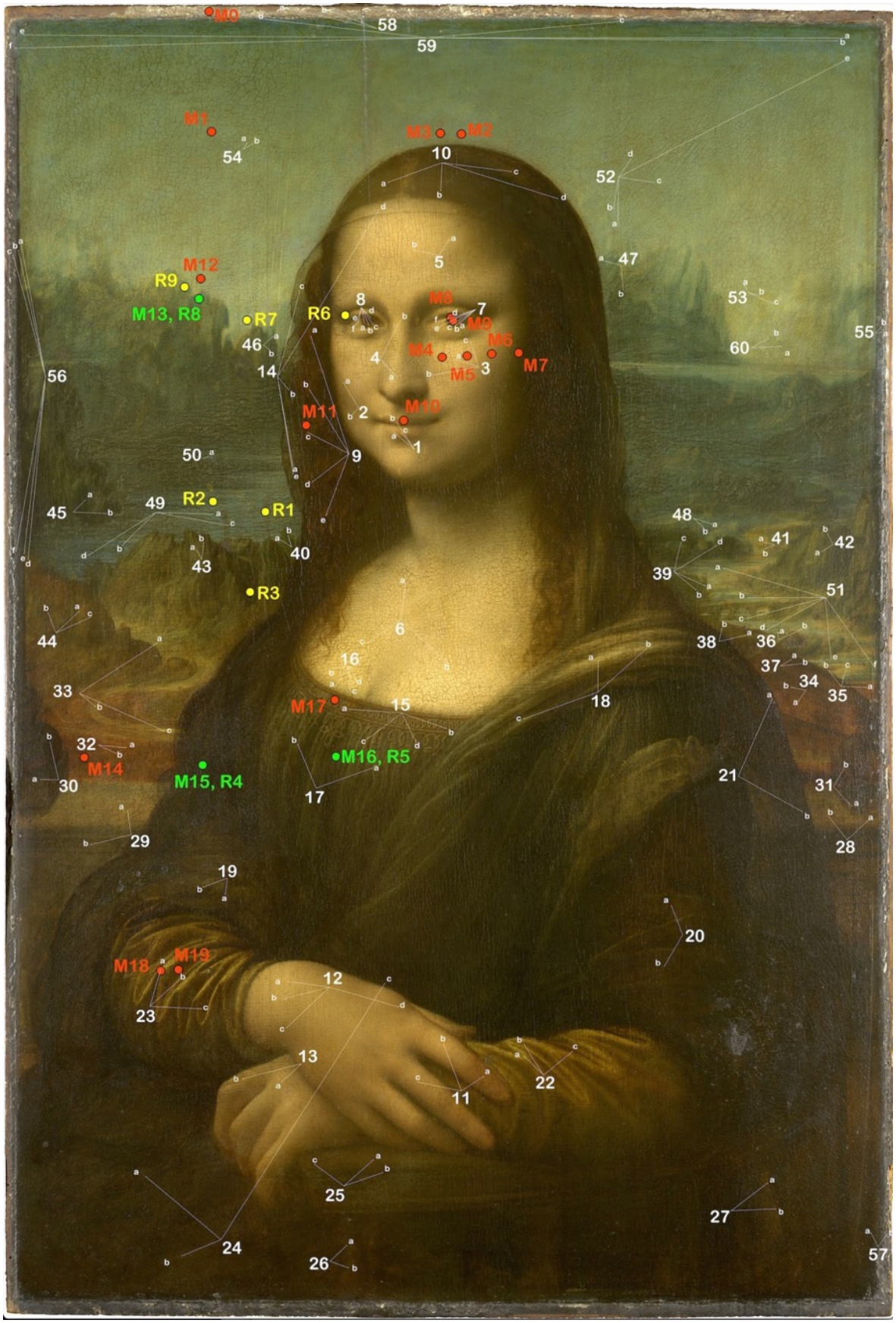
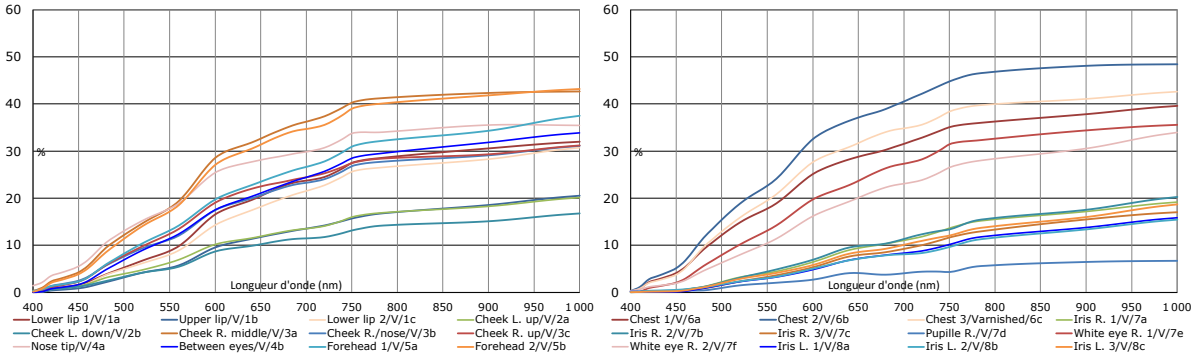


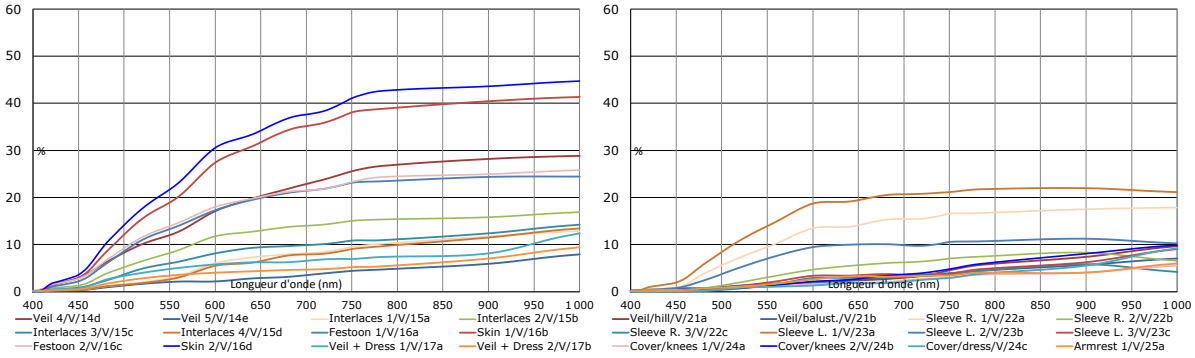

*Figure 104 - Carte des points de mesures pour l'identification des pigments sur* La Joconde *:*
*Numéros blancs (1-60), 173 échantillons de spectrophotométrie par caméra multispectrale ; numéros jaunes (R1-9), spectroscopie Raman ; numéros rouges (MØ-19), fluorescence X ; numéros verts (M+R au même endroit), spectroscopie Raman + fluorescence X.* © P. Cotte




Graph n°1



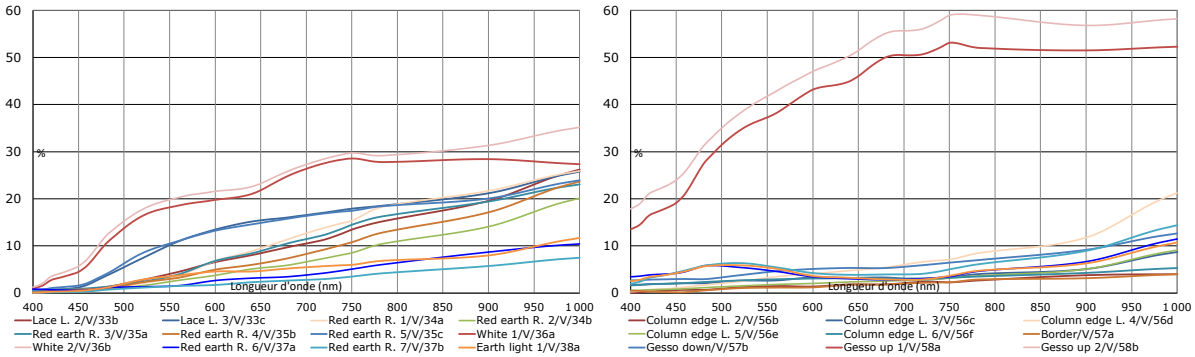

Graph n°2




Graph n°3



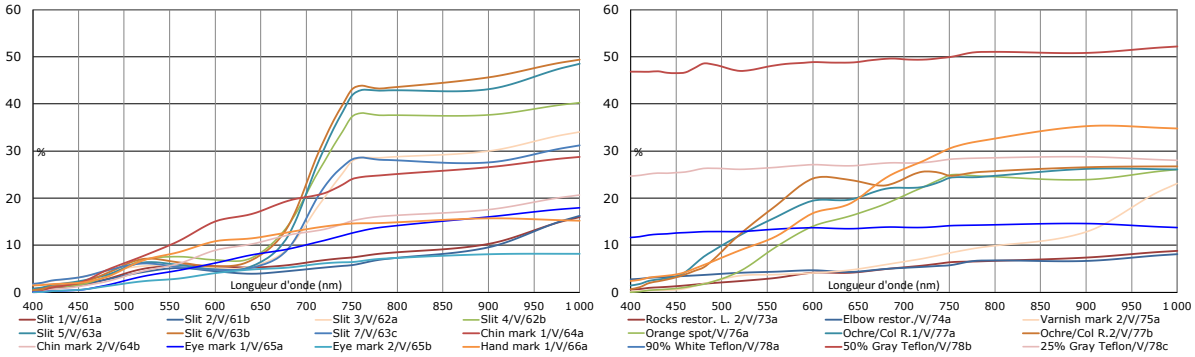

Graph n°4




Graph n°5




Graph n°6




Graph n°7




Graph n°8

*Figure 105 - Exemples de spectres mesurés sur La Joconde avec la caméra multispectrale, reconstruction PCHIP*

### 5.4.4 Les méthodes pour identifier les pigments à l'aide de la spectrophotométrie

**1/ La méthode analytique**

La première approche pour identifier un pigment repose sur l'analyse de sa courbe spectrale, en référence à une base de données de spectres caractéristiques de pigments purs utilisés durant la Renaissance en Italie. Ces courbes présentent des caractéristiques spectrales uniques à chaque pigment, permettant ainsi leur identification. L'observation de ces caractéristiques peut souvent suffire pour identifier les pigments, même dans des mélanges complexes. Un organigramme d'identification peut également être employé pour faciliter cette analyse (Cosentino, 2014).

**Pigments bleus**

La longueur d'onde dominante combinée à l'infrarouge proche (NIR) suffit parfois à les identifier. Le bleu égyptien a un maximum IR à 900 nm ; le smalt est plus réfléchissant en IR à 750 nm que le lapis-lazuli, etc. Les signes distinctifs principaux peuvent même être trouvés dans des mélanges avec d'autres pigments, comme le blanc de plomb.

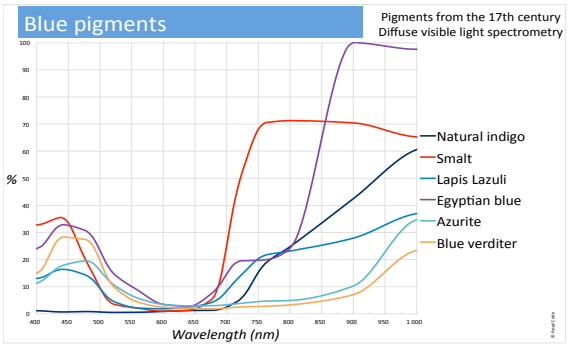



*Figure 106 - Spectres des pigments bleus mesurés avec la caméra multispectrale*

**Pigments verts**

Une difficulté supplémentaire provient de la couleur verte, qui peut être obtenue par le mélange de pigments bleus et jaunes. Cependant, à l'exception de cette complexité, les pigments verts sont presque aussi simples à identifier que les pigments bleus.

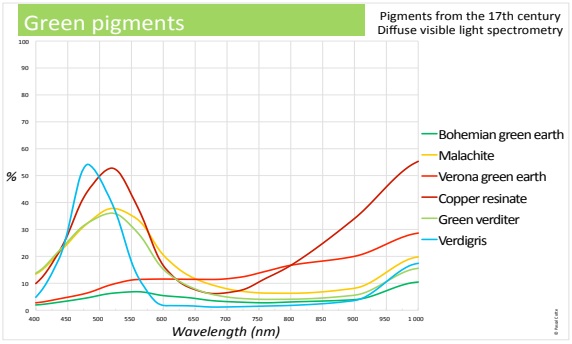



*Figure 107 - Spectres des pigments verts mesurés avec la caméra multispectrale*

**Pigments rouges**

Les pigments rouges sont encore plus courants. Léonard avait à sa disposition de nombreuses ocres rouges (oxydes, terres, ombres), mais celles-ci tendent à se ressembler - à l'exception du vermillon (ou cinabre), facilement identifiable grâce à la pente abrupte de son spectre débutant à 560 nm ; et des ocres rouges avec leur bosse à 760 nm (voir flèche sur Figure ci-contre). Il est donc très difficile de les identifier, car près des deux tiers de la bande spectrale dans le domaine visible sont noirs ; seule la bande de 600 à 700 nm fournit des données, bien que celles-ci ne soient pas toujours pertinentes.

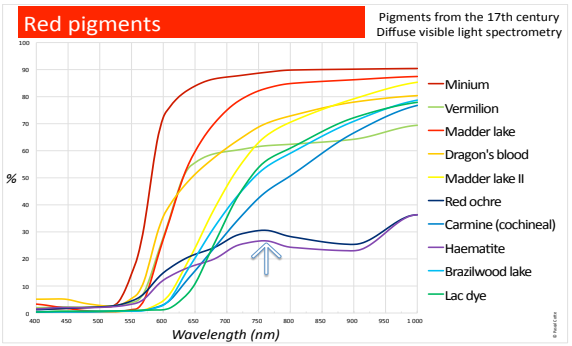



*Figure 108 - Spectres des pigments rouges mesurés sur la mire XVII^e avec la caméra multispectrale*

### Pigments jaunes utilisés jusqu'au XVII$^{e}$ siècle

À l'exception de l'ocre jaune et de la limonite, facilement identifiables par leur bosse à 760 nm (voir flèche Figure ci-contre), les autres pigments se ressemblent beaucoup.

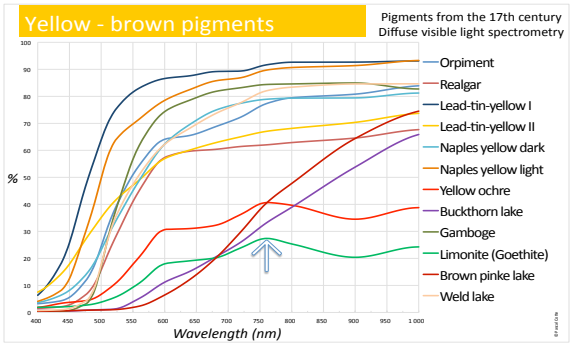



*Figure 109 - Spectres des pigments jaunes mesurés sur la mire XVII$^{e}$ avec la caméra multispectrale*

### Pigments blancs et noirs utilisés jusqu'au XVII$^{e}$ siècle

Le pigment blanc le plus courant est le blanc de plomb, également connu sous le nom de céruse. Son spectre est plat, avec juste une légère courbure en dessous de 420 nm. La craie blanche était l'autre pigment blanc. Ces deux pigments blancs peuvent être facilement identifiés s'ils ne sont pas mélangés. Les noirs sont plus difficiles à reconnaître. Par définition, ils absorbent toute la lumière et sont à peine visibles en bas du graphique.

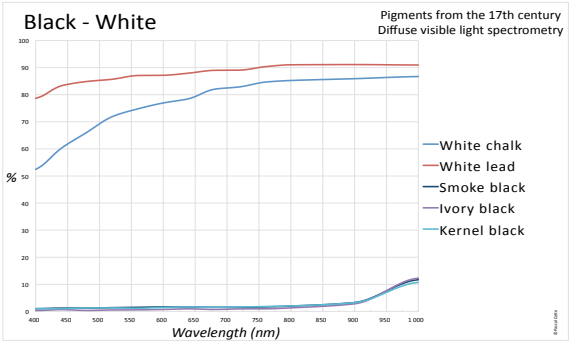



*Figure 110 - Spectres des pigments blancs et noirs mesurés sur la mire XVII$^{e}$ avec la caméra multispectrale*

Les caractéristiques observées dans les spectres de *La Joconde* sont rapportées dans le tableau récapitulatif des identifications (voir Tableau 10).

### 2/ Méthode d'identification avec le logiciel de comparaison spectrale du CNRS

Pour identifier un pigment unique et isolé, nous avons utilisé une méthode développée par la Pr Mady Elias, du groupe Optique & Art à l'Institut des Nanosciences de Paris (INSP), une unité mixte de recherche du CNRS et de l'UPMC-Sorbonne. Ce laboratoire a constitué une base de données spectrales riche et diversifiée, contenant plus de 300 pigments ainsi que des logiciels spécialisés en reconnaissance spectrale. Ce choix permet de bénéficier d'une variété étendue de pigments et vise surtout à augmenter la fiabilité des résultats en introduisant une source différente de pigments de référence.
Le spectre de *La Joconde*, corrigé pour éliminer l'influence du vernis, est ensuite comparé à cette base de données. Le logiciel identifie les pigments dont le spectre présente la plus grande similarité avec le spectre mesuré, en calculant la différence quadratique moyenne. Il prend également en compte d'éventuelles variations de rugosité de surface, qui peuvent entraîner un décalage vertical du spectre, ainsi que la présence d'un vernis, qui induit une homothétie verticale. Cette méthode permet ainsi de déterminer le pigment principal présent dans chaque couche analysée.

### 3/ Méthode d'identification avec un logiciel de formulation de pigments

Les logiciels de formulation utilisés dans l'industrie offrent des possibilités intéressantes pour calculer les composants colorés en vue d'obtenir une teinte spécifique sur un support donné. Le logiciel Colibri™, développé par Ciba™, en est un excellent exemple. Basé sur le rapport K/S (Kubelka et Munk, 1931) et sa version multicouches (Kubelka, 1948, 1954), disponible en version 6-flux ou 16-flux, il analyse la couleur recherchée et propose, à partir des pigments connus disponibles dans sa base de données, des combinaisons avec un liant permettant de la reconstituer. Lorsqu'on utilise ce logiciel pour retrouver un spectre à partir d'un mélange de pigments, on parle alors de rétro-ingénierie. En

effet, Colibri™ analyse la couleur cible et, en se basant sur sa base de données de pigments et de liants, reconstitue les combinaisons possibles pour reproduire cette couleur. Ce processus inverse consiste à déduire la composition pigmentaire originale d'une couleur mesurée en reconstituant le mélange initial des pigments pour obtenir le spectre souhaité.

Mais pour pouvoir utiliser ce logiciel il est nécessaire de constituer une nouvelle base de données pigmentaires spécifique. Dans ce but la bibliothèque de pigments, créée en 2007 en collaboration avec François Perego, auteur du *Dictionnaire des matériaux du peintre* (Perego, 2005), regroupe 43 pigments commercialement disponibles, soigneusement sélectionnés pour identifier ceux utilisés jusqu'au XVII$^{e}$ siècle (voir Tableau 9). Cette base de données de référence inclut à la fois des pigments qui auraient été accessibles à Léonard de Vinci et d'autres qui ne l'auraient pas été, facilitant ainsi la reconnaissance de la palette d'autres peintres. La collection est présentée sous six variantes distinctes (voir Figure 111), permettant d'évaluer leurs propriétés, telles que la force colorante et la transparence, dans différents contextes d'application.

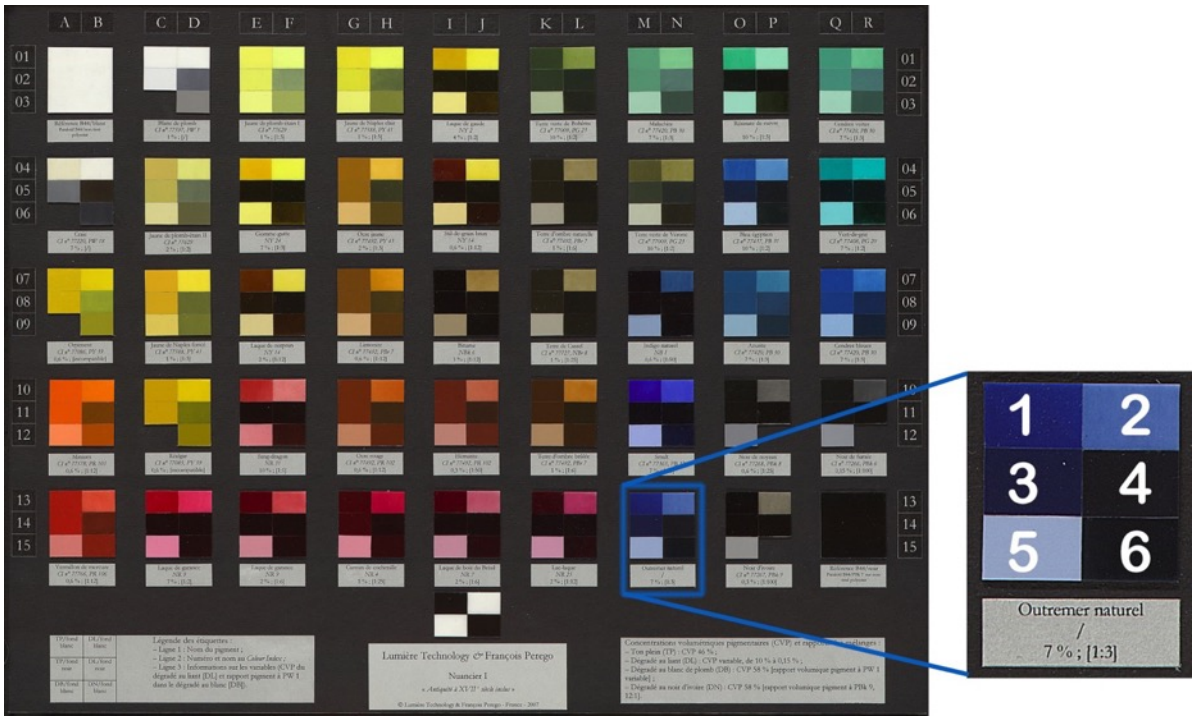



*Figure 111 - Mire des pigments utilisés jusqu'au XVII$^{e}$ siècle, réalisé par F. Perego et Lumière Technology*
*Chaque pigment est décliné de six manières : sur un fond blanc ❮1 & 2❯ et un fond noir ❮3 & 4❯ ; avec des niveaux de dilution faibles ❮1 & 3❯ et élevés ❮2 & 4❯ (chaque dilution étant spécifique à chaque pigment) ; mélangé avec du blanc de plomb ❮5❯ ; et mélangé avec du noir d'ivoire ❮6❯. (voir la liste des noms Tableau 9)*

Le modèle de base de données a été développé pour répondre aux exigences du logiciel de formulation Colibri™, permettant ainsi de caractériser ces pigments selon le rapport K/S. Chaque pigment est d'abord appliqué à concentration moyenne sur des fonds noirs (❮3❯) et blancs (❮1❯), simulant ainsi son utilisation habituelle. Ensuite, le pigment est testé à une concentration plus faible sur les mêmes fonds noirs (❮4❯) et blancs (❮2❯) pour observer son comportement en cas de dilution plus prononcée. Enfin, chaque pigment est mélangé avec du noir (❮6❯) et du blanc (❮5❯) afin d'analyser les modifications de ses caractéristiques lorsqu'il est associé à ces teintes extrêmes. L'épaisseur de la couche de pigment varie de 30 à 50 µm selon la nature du pigment.

| White (1) | Kremer | CI | Class | Chart |
|---|---|---|---|---|
| White chalk | 58100 | 77220 | PW 18 | A-4 |
| Lead white | 46006 | 77597 | PW 1 | C-1 |
| **Black (2)** | | | | |
| Charcoal black | 12010 | 77268 | PBk 8 | O-10 |
| Ivory black | 12000 | 77267 | PBk 9 | O-13 |
| Lamp black | 47250 | 77266 | PBk 6 | Q-10 |
| **Red - Orange (3)** | | | | |
| Vermilion | 42000 | 77766 | PR 106 | A-13 |
| Madder lake | 37202 | | NR 9 | C-13 |
| Dragon's blood | 37000 | 75210 | NR 31 | E-10 |
| Madder lake II | 37203 | 75330 | NR 9 | E-13 |
| Red ochre | 11274 | 77491 | PR 102 | G-10 |
| Carmine (cochineal) | 42100 | | NR 4 | G-13 |
| Minium | 42500 | 77578 | PR 105 | A-10 |
| Haematite | 48651 | 77491 | PR 102 | I-10 |
| Brazilwood lake | 36150 | 75280 | NR 24 | I-13 |
| Lac dye | 36020 | 75450 | NR 25 | K-13 |

| Blue (4) | Kremer | CI | Class | Chart |
|---|---|---|---|---|
| Natural indigo | 36002 | 75780 | NB 1 | M-7 |
| Smalt | 10000 | 77365 | PB 32 | M-10 |
| Natural ultramarine | 10530 | 77007 | PB 29 | M-13 |
| Egyptian blue | 10060 | 77437 | PB 31 | O-4 |
| Azurite | 10200 | 77420 | PB 30 | O-7 |
| Blue verditer | 10180 | 77420 | PB 30 | Q-7 |
| **Green (5)** | | | | |
| Bohemian green earth | 40810 | 77009 | PG 23 | K-1 |
| Malachite | 10300 | 77420 | PB 30 | M-1 |
| Verona green earth | 11000 | 77009 | PG 23 | M-4 |
| Copper resinate | 12200 | | | O-1 |
| Green verditer | | 77420 | PB 30 | Q-1 |
| Verdigris | 44450 | 77408 | PG 20 | Q-4 |

| Yellow - Brown (6) | Kremer | CI | Class | Chart |
|---|---|---|---|---|
| Lead-tin-yellow I | 10100 | 77629 | | E-1 |
| Lead-tin-yellow II | 10120 | 77629 | | C-4 |
| Orpiment | 10700 | 77086 | PY 39 | A-7 |
| Realgar | 10800 | 77085 | PY 39 | C-10 |
| Gamdoge | 37050 | | NY 24 | E-4 |
| Naples yellow deep | 10130 | 77588 | PY 41 | C-7 |
| Naples yellow light | | 77588 | PY 41 | G-1 |
| Limonite (Goethite) | | 77492 | PBr 7 | G-7 |
| Yellow ochre | 11272 | 77492 | PY 43 | G-4 |
| Weld lake (*Reseda luteola*) | 36262 | 75590 | NY 2 | I-1 |
| Buckthorn lake | | 75660 | NY 14 | E-7 |
| Brown pinke lake *Stil-de-grain* | 37394 | 75440 | NY 14 | I-4 |
| Asphaltum | 47600 | | NBk 6 | I-7 |
| Raw umber earth | 40611 | | PBr 7 | K-4 |
| Cassel earth | | 77727 | NBr 8 | K-7 |
| Burnt umber earth | 40710 | 77727 | PBr 8 | K-10 |

*Tableau 9 - Liste des pigments disponibles au XVII^e siècle, incluant la période de la Renaissance italienne . - Col. 1 : Noms historiques anglais ; Col. 2 : Réf. Kremer ; Col. 3 : Numéro de constitution de l'indice de couleur ; Col. 4 : Noms génériques de l'indice de couleur ; Col. 5 : Coordonnées sur le tableau Figure 111 - Les noms anglais et les références des pigments ont été vérifiés dans les bases de données : www.kremer-pigmente.com et www.artiscreation.com*

**Fonctionnement du logiciel de formulation**

Le logiciel de formulation exploite une base de données contenant les spectres mesurés pour l'ensemble des échantillons de la mire du XVII^e siècle. Pour générer une proposition de formulation pour un point ou échantillon de *La Joconde*, il est nécessaire de fournir au logiciel le spectre de l'échantillon ainsi que le spectre du fond (blanc de plomb). Le logiciel propose ensuite plusieurs formulations potentielles de mélanges de pigments.

Dans la fenêtre utilisateur du logiciel (voir Figure 112), l'espace intitulé "Autres propositions" présente diverses options de formulations de pigments de premier, deuxième, et troisième ordre. La section "Critères de sélection" contient les calculs des écarts en ΔE sous différents illuminants. Enfin, l'espace "Formulation" affiche une des propositions optimales, comprenant les pourcentages de liant et de pigments requis pour obtenir un spectre proche de celui recherché. Il arrive que le logiciel inclue également de très petites quantités d'autres pigments pour affiner au maximum la correspondance spectrale.

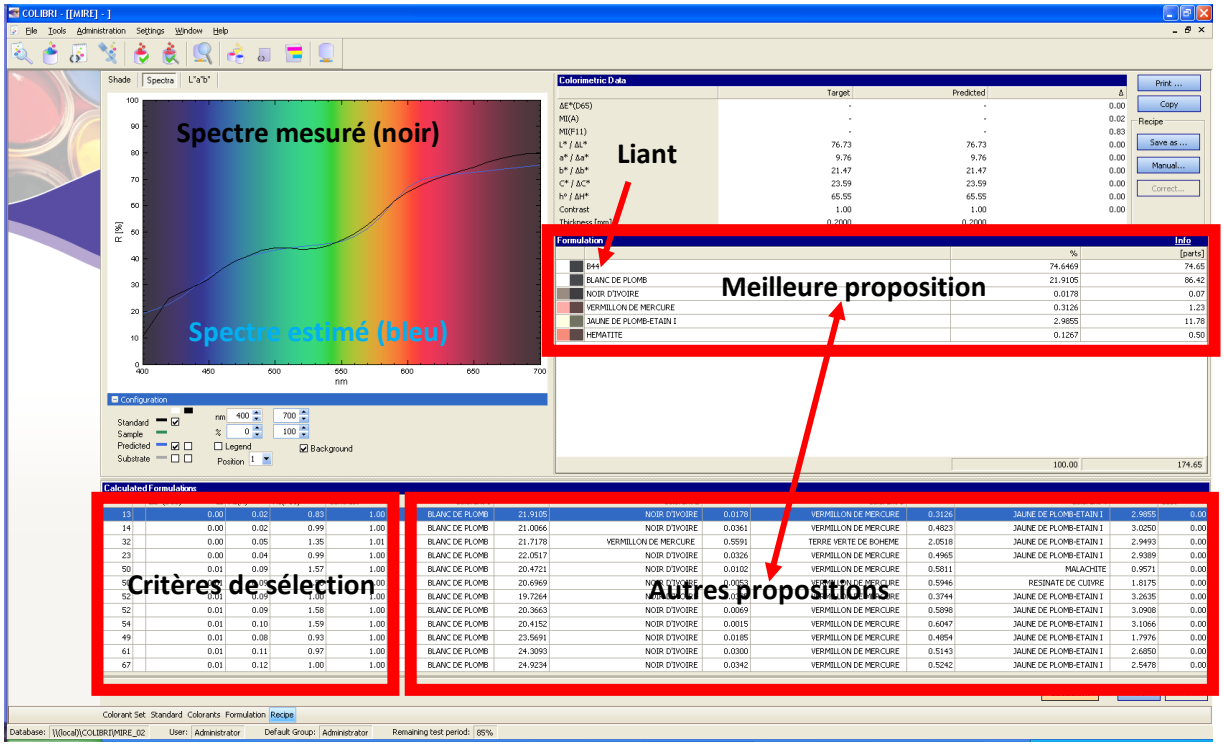



*Figure 112 - Écran du logiciel de formulation © Ciba*

### 5.4.5 Le travail d'identifications et de vérifications avec le logiciel de formulation

**Les prédictions finales sont établies en tenant compte des paramètres suivants :**

• La proportion de liant proposée par le logiciel doit être supérieure à 10 %

• Les écarts colorimétriques $\Delta E_{2000}$ entre le spectre mesuré et le spectre prédit, calculés sous l'illuminant D65, sont pris en considération.

• Les écarts colorimétriques $\Delta E_{2000}$ entre la proposition sous l'illuminant D65 et les illuminants A, F11, et D50 sont également évalués.

• La meilleure proposition est déterminée en comparant le spectre simulé avec le spectre mesuré.

Bien que la proportion de liant fixée à 10 % puisse sembler faible, surtout par rapport aux proportions typiques dans les peintures à l'huile (variant entre 20 % et 80 %), il est nécessaire de maintenir une certaine flexibilité compte tenu des nombreuses incertitudes liées aux paramètres de vieillissement.

• Enfin, comme le logiciel est limité au domaine spectral de 400 à 700 nm, il est essentiel de croiser cette information avec les spectres infrarouges mesurés par la caméra multispectrale. Cette comparaison permet d'identifier certains pigments particulièrement absorbants ou réfléchissants dans l'infrarouge, ajoutant ainsi un critère supplémentaire pour confirmer ou invalider une proposition.

Il convient également de tenir compte des techniques picturales et des incompatibilités de pigments pour choisir la prédiction la plus adéquate. Comme le logiciel de formulation n'intègre pas de paramètres d'incompatibilité des mélanges, l'opérateur doit être averti pour éviter des associations de pigments historiquement ou chimiquement improbables.

**Orpiment ($As_2S_3$) (sulfure d'arsenic) et Pigments à base de plomb**

L'orpiment, un pigment jaune vif constitué de sulfure d'arsenic, est incompatible avec les pigments à base de plomb, tels que le blanc de plomb ($PbCO_3$) et le vermillon (HgS). Cette incompatibilité résulte de la réaction chimique entre le soufre contenu dans l'orpiment et le plomb, formant du sulfure de plomb (PbS), qui noircit la peinture.

**Vermillon/Cinabre ($HgS$) (sulfure de mercure) et Orpiment**

Le vermillon, un pigment rouge vif correspondant à la phase $\alpha$ − HgS du sulfure de mercure. Il peut subir un noircissement au fil du temps en présence d'orpiment, en se transformant en métacinabre $\alpha'$ − HgS qui est une autre phase du sulfure de mercure (Gettens, Kühn et Chase, 1993).

**Réalgar ($\alpha - As_4S_4$) (sulfure d'arsenic)**

Le réalgar est un pigment rouge-orangé, connu pour sa toxicité due à l'arsenic et son instabilité à la lumière, qui le fait souvent se décomposer en pararealgar jaune ($\beta - As_4S_4$). Ces propriétés limitent son utilisation lorsqu'il est mélangé avec d'autres pigments soufrés, entraînant des réactions indésirables.

**Pigments organiques et Orpiment ou Réalgar**

Les pigments organiques, tels que les laques ou les teintures dérivées de plantes, sont souvent instables lorsqu'ils sont mélangés avec des pigments à base de soufre, comme l'orpiment et le réalgar. Cela peut conduire à la décoloration ou à la détérioration de la peinture.

**Azurite ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) (carbonate de cuivre) et Pigments à base de soufre**

L'azurite, un pigment bleu constitué de carbonate de cuivre instable en présence de soufre, comme celui présent dans l'orpiment ou le réalgar. Ces combinaisons peuvent provoquer des changements de couleur ou une décomposition des pigments.

**Verdigris (acétate de cuivre) et Blanc de Plomb**

Verdigris, un pigment vert à base de cuivre, peut réagir avec les pigments à base de plomb, entraînant la formation de composés qui se dégradent avec le temps. L'usage de mélange cuivre et plomb était malgré cela très courant. (Platania et al., 2020) (Gettens, Kühn and Chase, 1993, page 136). Léonard de Vinci, a probablement utilisé de l'huile de lin comme barrière protectrice qui peut modérer la réaction chimique.

L'utilisation du verdigris et du blanc de plomb dans les œuvres de Léonard de Vinci et ses élèves (Bonizzoni et al., 2017) pourrait également s'expliquer par les propriétés chimiques de ce pigment qui existe sous au moins deux formes distinctes (Bette et al., 2017) (Gettens, Kühn et Chase, 1993) :

• L'acétate neutre de cuivre $Cu(CH^3COO)^2 \cdot H^2O$

• L'acétate basique de cuivre $Cu(CH^3COO)^2 \cdot Cu(OH)_2 \cdot 6H^2O$

Ce dernier, souvent appelé "vert-de-gris bleu", a fait dire à certains historiens, que le voile de *La Joconde* pouvait être bleu. Il contient une composante $Cu(OH)_2$ plus hydratée, qui donne une réaction faiblement alcaline en solution aqueuse et joue un rôle modérateur minimisant la formation de composés. Léonard de Vinci, à travers ses nombreuses expérimentations, a pu préférer cette forme, permettant ainsi une utilisation des deux pigments ensemble.

Léonard mentionne dans ses écrits une méthode pour augmenter la beauté du verdigris en y ajoutant de l'aloès caballin. Selon ses propres mots :

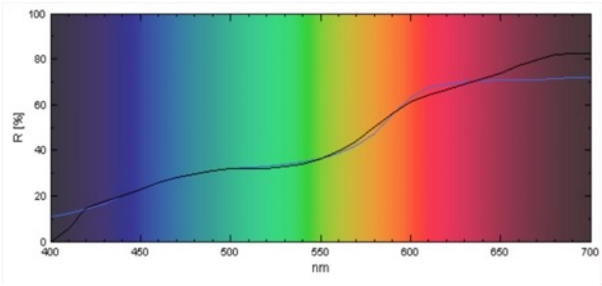
*"Si avec le vert-de-gris on mêle l'aloès caballin, ce vert-de-gris sera beaucoup plus beau qu'il n'était auparavant, et il ferait mieux encore avec le safran, s'il ne s'évaporait point en fumée. La bonté de l'aloès caballin se reconnaît lorsqu'il se dissout dans l'eau-de-vie chaude, parce qu'alors elle a plus de force pour dissoudre que quand elle est froide ; et si après avoir employé ce vert-de-gris en quelque ouvrage, on passe dessus légèrement une couche de cet aloès liquéfié, alors la couleur deviendra très-belle ; et cet aloès se peut encore broyer à l'huile séparément, ou avec le vert-de-gris, et avec toute autre couleur qu'on voudra."* (Vinci et Chastel, 2003)

L'aloès caballin, bien qu'il ne soit pas basique, pourrait agir comme modérateur chimique dans le mélange de verdigris et de blanc de plomb en formant une couche protectrice autour des pigments, en augmentant la viscosité pour limiter la réactivité, et en absorbant partiellement la lumière UV, réduisant ainsi la photodégradation.

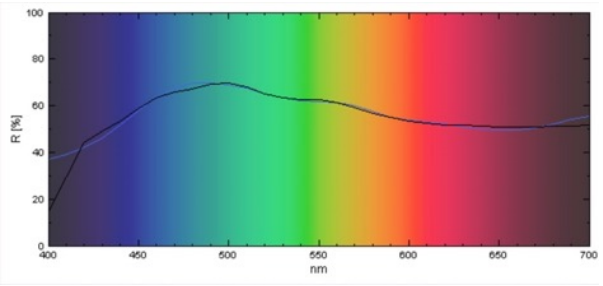
Cette combinaison d'huile de lin, d'aloès caballin, et du verdigris-bleu sous sa forme basique, aurait contribué à préserver la qualité visuelle et la durabilité du pigment verdigris dans ses œuvres.

Après avoir pris en compte les combinaisons de pigments incompatibles, nous avons pu affiner les prédictions du logiciel de formulation. Cette étape de vérification garantit que les pigments identifiés correspondent non seulement aux caractéristiques spectrales mesurées, mais également aux pratiques historiques et chimiques de l'époque de Léonard de Vinci. La liste des combinaisons de pigments incompatibles, établie à partir des connaissances de l'époque, a ainsi permis d'écarter certaines propositions inappropriées.

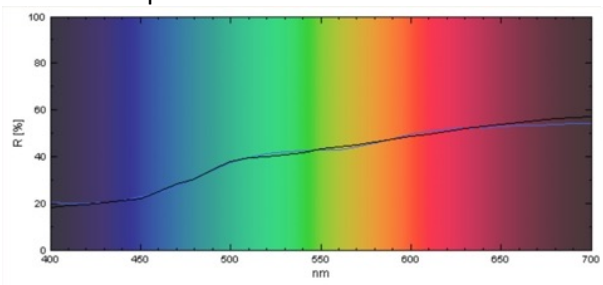
Nous pouvons maintenant présenter les résultats finaux des pigments identifiés dans *La Joconde*, validés par ces critères stricts d'analyse spectrale et d'historicité.



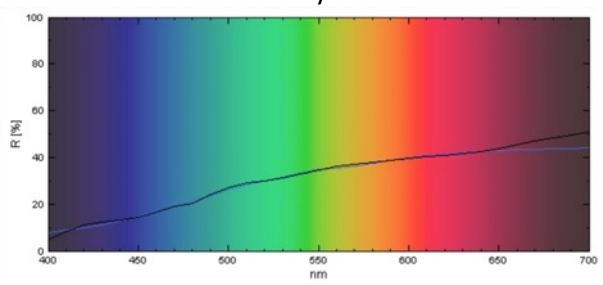

1a - Lower lip 1



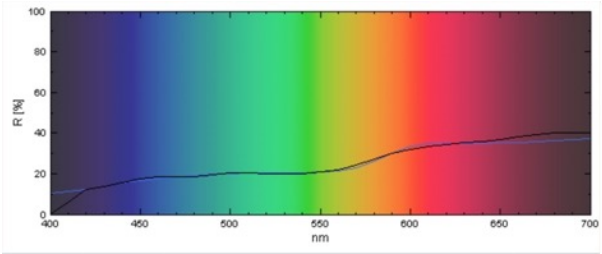

53c - Clear sky R. 3



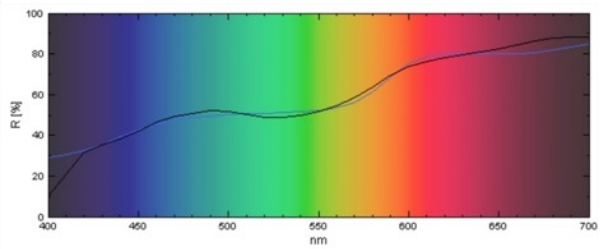

35c - Red earth R. 5



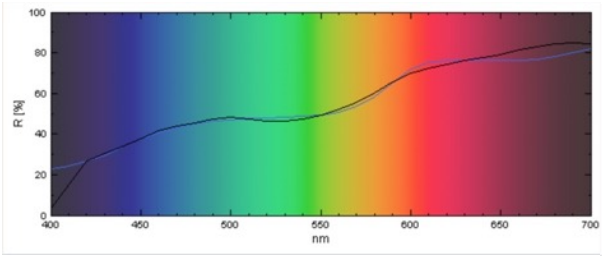

41a - Yellow zone R. 1



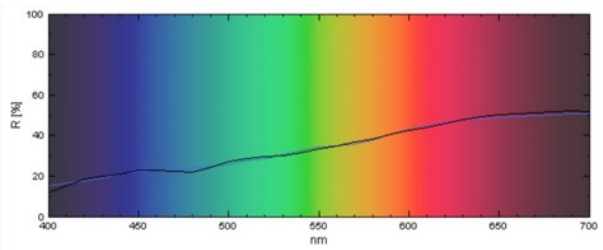

2b - Cheek L. down



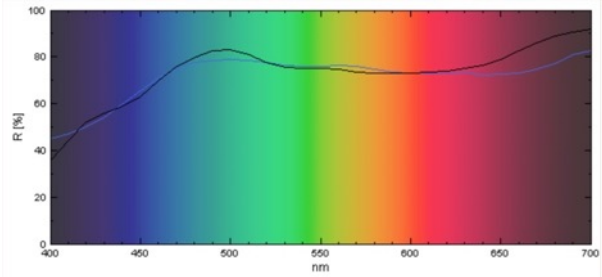

3a - Cheek R. middle



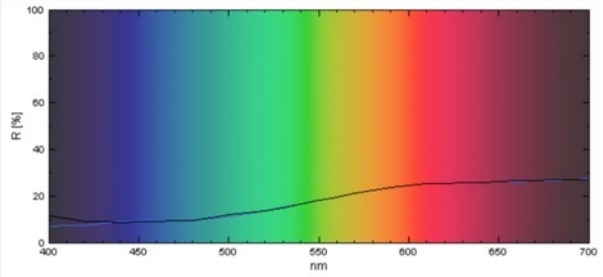

5b - Forehead 2




28a - Balustrade R. 1




36a - White 1




44a - Rocks L. 3

*Figure 113 - Comparaison des spectres mesurés (traits noirs) et des prédictions de mélanges optimisés (traits bleus) sur* La Joconde *par le logiciel de formulation Colibri™*

**Propositions de mélange identifiés avec le logiciel de formulations**

*Les noms de pigments sont donnés en anglais.*

| | | |
|---|---|---|
| **Point 3a (Cheek)** | | |
| White lead: | > 40 % | |
| Vermilion: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 2 % | |
| **Point 3b (Cheek)** | | |
| White lead: | > 25 % | |
| Vermilion: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 2 % | |
| **Point 5a (Forehead)** | | |
| White lead: | > 25 % | |
| Vermilion: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 5 % | |
| **Point 6a (Chest)** | | |
| White lead: | > 25 % | |
| Vermilion: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 2 % | |
| **Point 8f (Eye white)** | | |
| White lead: | > 10 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 2 % | |
| **Point 12b (hand)** | | |
| White lead: | > 20 % | |
| Vermilion: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 3 % | |
| **Point 15b (Interlace)** | | |
| White lead: | < 2 % | |
| Red ochre: | < 1 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 3 % | |
| **Point 17a (Dress)** | | |
| White lead: | > 5 % | |
| Verdigris: | > 5 % | |
| **Point 20b (Veil on sleeve)** | | |
| White lead: | < 2 % | |
| Buckthorn lake: | > 65 % | |
| Verdigris: | > 8 % | |
| **Point 21a (Veil on hill)** | | |
| White lead: | < 1 % | |
| Red ochre: | > 9 % | |
| Verdigris: | > 10 % | |
| **Point 23a (Sleeve)** | | |
| White lead: | > 6 % | |
| Lead-tin-yellow I: | > 5 % | |
| **Point 23c (Sleeve)** | | |
| Ivory Black: | < 1 % | |
| Buckthorn Lake: | > 70 % | |
| Lead-tin-yellow I: | < 1 % | |
| **Point 28a (Balustrade)** | | |
| White lead: | > 20 % | |
| Yellow ochre: | > 6 % | |
| **Point 32b (Red earth)** | | |
| Red ochre: | > 10 % | |
| **Point 33b (Valley)** | | |
| Yellow ochre: | > 25 % | |
| **Point 34a (Red earth)** | | |
| Red ochre: | > 14 % | |
| **Point 36b (River white point)** | | |
| White lead: | > 70 % | |
| **Point 38b (Earth light)** | | |
| Yellow ochre: | > 15 % | |
| **Point 39c (Green zone)** | | |
| Verdigris: | > 33 % | |
| **Point 43a (Green rocks)** | | |
| Green earth: | > 35 % | |
| **Point 44a (Rocks)** | | |
| Yellow ochre: | > 27 % | |
| **Point 47a (Rocks - sky)** | | |
| White lead: | > 19 % | |
| Lapis lazuli: | > 10 % | |
| Verdigris: | > 11 % | |
| **Point 48a (Lake)** | | |
| White lead: | < 3 % | |
| Lapis lazuli: | > 25 % | |
| **Point 50a (Lake)** | | |
| White lead: | > 18 % | |
| Lapis lazuli: | > 22 % | |
| **Point 51e (River)** | | |
| White lead: | > 14 % | |
| Lapis lazuli: | > 10 % | |
| **Point 52a (Sky)** | | |
| White lead: | > 35 % | |
| Lapis lazuli: | > 10 % | |
| **Point 52e (Sky)** | | |
| White lead: | > 13 % | |
| Lapis lazuli: | > 20 % | |
| **Point 56c (Ext. column)** | | |
| Yellow ochre: | > 8 % | |
| Burnt umber earth: | > 3 % | |
| **Point 59a (Top)** | | |
| White lead: | > 3 % | |
| Azurite: | > 19 % | |

**Résultats**
Le tableau ci-après (voir Tableau 10) présente un résumé des résultats obtenus par chacune des cinq méthodes d'identification, organisés par colonne pour faciliter la comparaison. La première colonne liste les références des points de mesure.

Les résultats obtenus ne doivent pas être interprétés comme contradictoires, mais comme complémentaires. Chaque méthode peut privilégier un pigment en fonction de sa localisation en profondeur ou en surface.

**Première colonne : Points de mesure**
Cette colonne regroupe les points de mesure sélectionnés sur *La Joconde* pour l'analyse.

**Deuxième colonne : Résultats de Colibri™**
Cette colonne reprend les résultats obtenus avec le logiciel Colibri™, tels que présentés précédemment.

**Troisième colonne : Méthode CNRS**
Cette colonne présente les pigments identifiés grâce au logiciel du CNRS.

**Quatrième colonne : Méthode analytique comparative**
Les résultats de cette colonne proviennent de l'analyse comparative directe des spectres en référence à une base de données de pigments purs.

**Cinquième colonne : Fluorescence X** (Laval, Pagès-Camagna et Walter, 2006)
La colonne « Fluorescence X » présente les résultats des points de mesure M0 à M19, qui ont été analysés en utilisant la fluorescence des rayons X avec l'instrument prototype ISTAR. Ce dispositif, équipé d'un détecteur Roentec Xflash refroidi à -10°C et d'un tube à rayons X Moxtek, permet de détecter les éléments chimiques présents, allant de Z=15 à Z=82, sur des surfaces de 1 mm². Les conditions spécifiques d'analyse pour *La Joconde* (sans hélium) autorisent une détection élémentaire de surface, mais ne fournissent pas d'information sur la profondeur des éléments dans la couche picturale.

Cette technique aide à identifier certains pigments en se basant sur les éléments détectés, bien que plusieurs pigments puissent partager les mêmes éléments constitutifs. Toutefois, le bleu outremer naturel ne peut pas être identifié par cette méthode, car l'aluminium (un élément caractéristique) est en dehors de son champ de détection. De même, les pigments organiques ne sont pas identifiables. Les résultats de la fluorescence X sont néanmoins pertinents pour la comparaison, même si les points de mesure ne coïncident pas exactement avec ceux des méthodes de spectrophotométrie.

**Sixième colonne : Spectroscopie Raman** (Laval, Pagès-Camagna et Walter, 2006)
La colonne « Raman » présente les résultats obtenus grâce à la spectroscopie Raman, aux points de mesure R1 à R9. Ces mesures ont été effectuées avec un spectromètre Infinity Jobin Yvon, équipé de deux filtres Notch, d'un réseau de 1800 traits et utilisant un laser rouge de 633 nm ainsi qu'un laser vert de 532 nm. Cette technique d'analyse moléculaire permet de mesurer des points d'un diamètre de 3 à 5 µm et d'obtenir un spectre représentant les niveaux de vibration des molécules, comparé ensuite à une base de données de pigments organiques et inorganiques.

Cependant, certains spectres (R1, R2, R4, R5 et R6) ne sont pas interprétables ou ne figurent pas dans la base de données du Louvre, ce qui limite leur utilité pour l'identification de certains pigments. Par ailleurs, aucun point n'a été mesuré dans le ciel de la peinture, une zone où le bleu outremer naturel aurait pu être détecté. Comme pour la fluorescence X, les points de mesure Raman ne coïncident pas exactement avec ceux de la spectrophotométrie visible, mais les informations obtenues restent complémentaires pour l'identification des pigments.

## 5.4.6 Comparaison avec les autres méthodes d'analyse

| © Pascal Cotte 2004-2025 | Spectrophotométrie + NIR | | | X-ray fluorescence | Raman spectro. | Zone |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ref. point | ® Colibri - Kubelka-Munk | CNRS | Visible + I.R. spectro. | *Mona Lisa inside the Painting* - Abrams New York (2006) pp.86-89 | | |
| 43a-b | Green earth | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde | | R3: Lead-tin-yellow | F |
| 14c | Natural Ultramarine | | Natural Ultramarine | | | Z |
| 36a-b, 58a-b, 60-b | White lead | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 36a-b | MØ [Edge]: White lead | | E-A |
| 59a-b-c-d-e-f, 60a | White lead / Azurite | | | | | A-B |
| 35c | White lead / Weld lake | | | | | K |
| 46a-b, 47a-b | White lead / Natural Ultramarine | Natural Ultramarine | Natural Ultramarine | M13: Azurite, green earth (celadonite) | R8: Same as M13; R7: Red iron oxyde, green earth (celadonite); R9: Green earth | C |
| 50a | Natural Ultramarine/ Green earth | Natural Ultramarine | Natural Ultramarine | | | D |
| 14a, 48a-b, 49a-b-c-d, 51a-b-c-d-e-f, 52a-b-c-d-e, 53a-b-c, 54a-b, 55a-b, 56a | White lead / Nat. Ultramarine | Nat. Ultramarine 49a-b, 51a-b-c-d-e-f, 52a-b-e, 53a, 55a-b | Natural Ultramarine | M1, M2, M3, M12: Copper blue | R1, R2: Not identified | Z-E-A Edge |
| 33c | White lead / Brown pinke lake | | | | | G |
| 10a | White lead / Umber earth | Natural umber earth | | | | Y |
| 17a, 18a-b | White lead / Verdigris | | | | | X |
| 7e, 15b, 16b-c-d, 23a | White lead / Lead-tin-yellow I | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde,7e, 15b | M17, M18: Lead-tin-yellow, copper green and ochre | | U-Q-O M |
| 23b | White lead / Lead-tin-yellow I / Buckthorn lake | | | | | M |
| 17b, 18c | White lead / Lead-tin-yellow I / Verdigris | | | M16: Copper green | R5: Not identified | X |
| 7f | White lead / Brown pinke lake | | | | | U |
| 3b, 11a | White lead / Vermilion | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 3b | M5: Vermilion, Burnt umber in variable proportion | | O |
| 1a, 2a-b, 3a-c,5a-b, 6a-b-c | White lead / Vermilion / Lead-tin-yellow I | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 1a, 2a, 3a-c, 5a-b | M4: Vermilion, Burnt umber in variable proportion | | S-V-O |
| 8f, 11b, 12a-b, 13a, 14d | White lead / Vermilion / Lead-tin-yellow I | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 12a-b | M6, M7: Vermilion, Burnt umber or earth pigment enriched manganese | | U-O-Y-V |
| 4a-b | White lead / Vermilion / Lead-tin-yellow I / Umber earth | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde | | R6: Not identified | O |
| 22a | Lead-tin-yellow I | | | | | M |
| 22b, 23c | Lead-tin-yellow I/Buckthorn lake | | | M19: Copper green and ochre | | M |
| 15c | Lead-tin-yellow I / Vermilion | | | | | Q |
| 7a-b | Umber earth / Red ochre | Burnt umber earth | | | | T |
| 7c, 8b-c-d, 24a-c | Natural umber earth / Burnt umber earth | Burnt umber earth, 7c, 8b-c-d, 24c | | M8 [IRIS]: Mixture of raw sienna and burnt umber(?), vermilion | | T-L |
| 19a-b, 22c, 25c, 27a-b,31b | Buckthorn lake | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 27a, 31b | | | M-P-I-N |
| 15a-d | Realgar / Vermilion | | | | | Q |
| 32b | Red ochre | | | M14: Red ochre, copper blue | | H |
| 34a | Red ochre / White lead | | | | | W |
| 35a | Red ochre / Yellow ochre | | | | | K |
| 8a, 9b, 56d-f | Umber earth | Umber earth,8a,9b | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 9b | | | T-R-I- |
| 10b-c | Umber earth / Realgar | Natural umber earth | | | | Y |
| 39c-d | Verdigris | | | | | K |
| 14b-e | Verdigris / Natural Ultramarine | | | M11: Raw Sienna (?), copper blue | | Z-R |
| 20a-b | Verdigris / Buckthorn lake | | | | | N |
| 21a | Verdigris / Red ochre | | | M15: Copper green and ochre or raw Sienna | R4: Not identified | X-(H) |
| 8e | Vermilion | | | | | U |
| 1b-c, 11c | Vermilion / Lead-tin-yellow I | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 1c | M10: Vermilion, Burnt umber or earth pigment enriched manganese | | S-O |
| 33b, 38b, 41a-b, 44a-c | Yellow ochre | Yellow ochre,44a-c | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 44a | | | G-K-E- |
| 33a | Yellow ochre / Weld lake | | | | | G |
| 28a-b | Yellow ochre / White lead | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 28a | | | J |
| 29a | Yellow ochre / White lead / Weld lake | | | | | J |
| 56c | Yellow ochre / Umber earth | | | | | Edge |
| 7d | not identified | | | M9 [PUPIL]: Unidentified black pigment, Vermilion,burnt umber | | T |
| 9a-c-d-e, 10d, 12c-d, 13b, 16a, 21b, 24b, 25a-b, 26a-b, 29b, 30a-b, 31a, 32a, 34b, 35b, 37a-b, 38a, 39a-b, 40a-b, 42a-b,44b,45a-b,56b-e,57a-b | not identified | | Earth/Ochre/Ferric-Oxyde, 9a-c | | | |
| *173 samples* | | | | | | |

*Tableau 10 - Synthèse des pigments identifiés sur* La Joconde *avec les cinq méthodes.*
*Classification des hypothèses de mélanges ou superpositions de pigments détectés par spectrophotométrie (Colonne grise)*

### 5.4.7 Discussion

**Analyse des résultats dans les différentes zones de la peinture**

Les pigments identifiés dans *La Joconde* correspondent en grande partie aux matériaux typiques de la Renaissance italienne. Pour le ciel, par exemple, le choix du bleu outremer mélangé au blanc de plomb est un grand classique. Étant donné le coût très élevé du bleu outremer à l'époque, ce choix de pigment suggère que le commanditaire était particulièrement aisé. Les tons de chair, présents dans le visage et les mains, se composent de blanc de plomb associé au vermillon, tandis que les paysages font principalement usage de terres et d'ocre. Pour les zones d'eau, telles que les rivières et les lacs, l'emploi d'outremer, bien qu'on puisse s'attendre aussi à de l'azurite, est également notable. La broderie d'entrelacs semble réalisée avec un mélange de vermillon et de jaune de plomb-étain de type I, tandis que les manches utilisent ce jaune de plomb-étain avec une laque. Ce choix de pigments jaunes pour les manches est moins typique. Les ombres réalisées avec des terres d'ombre.

Particulièrement singulier est l'usage du verdigris pour le voile, une approche risquée en raison de la difficulté technique de stabiliser ce pigment lorsqu'il est combiné au blanc de plomb. L'ensemble de ces choix de pigments reflète donc la richesse de la palette employée et certains aspects singuliers de l'approche de Léonard de Vinci.

**Limites des techniques et des outils de modélisation utilisés**

Les différentes techniques utilisées présentent chacune des limitations spécifiques. La spectrophotométrie, par exemple, a un spectre relativement étroit, ce qui limite parfois l'identification de certains pigments ou mélanges. En raison de l'étendue des combinaisons possibles, certains pigments ou nuances échappent également à l'identification. En fluorescence X, l'analyse de surface est trop large, ce qui, en combinaison avec l'analyse en profondeur, peut entraîner des erreurs si les couches internes interfèrent. La spectroscopie Raman souffre également de limitations similaires puisqu'elle peut pénétrer dans les couches sous-jacentes, augmentant ainsi le risque d'interférence entre les différentes strates picturales.

Les outils employés, tels que Colibri™, comportent également des limitations. Colibri™ fonctionne sur un spectre limité de 400 à 700 nm, ce qui exclut la proximité de l'infrarouge et peut influencer la précision des résultats, notamment pour les pigments métamères. En XRF, certains pigments nécessitent un flux d'hélium pour une analyse précise, un paramètre qui n'a pas été utilisé ici. Par ailleurs, bien que la spectroscopie Raman offre une grande précision pour les pigments inorganiques, elle se révèle limitée pour les pigments organiques.

Les interférences entre les couches picturales, comme celles issues du vernis ou de sous-couches multiples, constituent également une source d'incertitude. *La Joconde* comporte en effet plusieurs versions superposées, et les pigments analysés pourraient donc provenir de couches inférieures. Ces interférences augmentent les incertitudes des identifications, particulièrement pour les techniques telles que l'XRF, le Raman et les infrarouges.

Les pigments organiques, et en particulier les laques jaunes, posent également des problèmes spécifiques. Les laques et les pigments organiques présentent une instabilité à long terme, notamment en présence de certains éléments tels que le réalgar, qui augmentent la dégradation (Padfield et Landi, 1966). Ces modifications risquent de rendre certaines couleurs impossibles à détecter ou de modifier leur apparence d'origine, ce qui complique leur identification dans une étude spectrale. La base de données inclut ainsi deux types de laques jaunes : la laque de gaude (*Reseda luteola*) et la laque stil-

de-grain, des plantes cultivées en Toscane autour de Florence et très utilisées pour leur intensité colorante, que Léonard connaissait (Casoli, Darecchio et Sarritzu, 2009).

**Degré de certitude et interprétation des pourcentages obtenus pour les liants et pigments**

Les pourcentages de liants obtenus dans cette étude, bien qu'indicatifs, sont représentatifs de mesures ponctuelles et ne doivent pas être interprétés comme reflétant l'ensemble de la surface picturale. De même, les correspondances spectrales et les proportions de liant sont influencées par le jeu de références utilisé ; ainsi, le choix de la base de données et des références a un impact direct sur la précision des correspondances spectrales.

L'identification des mélanges de pigments dans *La Joconde* constitue l'une des contributions de cette étude, réalisée grâce au logiciel de formulation. Les pourcentages de pigments trouvés dans les mélanges semblent cohérents avec les pratiques picturales italiennes de la Renaissance, confirmant ainsi la pertinence des méthodes employées.

**Signification des ajustements et des différences entre les méthodes**

Les différences entre les résultats des trois méthodes spectrophotométriques (logiciel Colibri™, méthode CNRS et méthode analytique comparative) s'expliquent en grande partie par les bases de données distinctes sur lesquelles elles reposent. Cette diversité méthodologique, loin d'être un inconvénient, renforce la validité des résultats lorsqu'ils coïncident, en offrant un contrôle croisé des informations spectrales.

La suppression virtuelle du vernis, réalisée pour éliminer l'influence du vernis jauni, a été indispensable pour optimiser l'utilisation du logiciel de formulation. En effet, sans cette correction préalable, de nombreux mélanges n'auraient pas pu être identifiés, et les paramètres de tolérance auraient dû être élargis au point de compromettre la fiabilité des résultats. Dans certains cas, cependant, l'altération chromatique due au jaunissement de l'huile ou à d'autres facteurs de vieillissement a pu rendre l'identification plus difficile, et ces cas, où les incertitudes demeurent trop élevées, n'ont pas été inclus dans les résultats finaux.

**Utilisation de pigments artificiellement vieillis ?**

Au fil du temps, les changements de couleur des œuvres d'art sont principalement attribuables au vieillissement du liant (huile) et du vernis, tandis que les pigments eux-mêmes restent généralement stables, protégés par ces couches. Dans cette étude, nous avons donc considéré les couleurs des pigments comme stables, en nous appuyant sur des études montrant qu'il est possible d'identifier des pigments anciens en utilisant des pigments neufs comme références (Balas et al., 2018). À l'exception des pigments organiques, la majorité des pigments anciens sont réputés stables sur des millénaires (Siddall, 2018). Il est d'ailleurs notable que Léonard de Vinci ne mentionne aucun pigment organique, mais seulement quelques additifs.

**Un liant neutre ?**

En l'absence de données précises sur la composition de l'huile utilisée par Léonard, nous avons choisi d'utiliser des pigments purs dans un liant neutre, le Paraloïd B44 (méthacrylate de méthyle), pour éviter les variations associées à un liant d'origine inconnue et garantir que les résultats de notre étude reflètent uniquement les propriétés intrinsèques des pigments.

**Opportunités et limites de l'utilisation d'un logiciel commercial et d'autres outils pour cette étude**

Bien que Colibri™ soit conçu à l'origine pour d'autres usages, son utilisation pour l'identification des mélanges de pigments dans *La Joconde* offre de nombreux avantages. Le logiciel permet d'automatiser le traitement de milliers de points de mesure et offre une grande fiabilité grâce à la multiplicité des mesures et à l'analyse systématique. De plus, il permet de simuler différents résultats en modifiant le spectre de la préparation sous-jacente à la couche picturale, offrant ainsi une flexibilité pour explorer l'influence des sous-couches sur la composition finale perçue.

Cependant, certaines adaptations ont été nécessaires pour utiliser Colibri™ dans ce contexte spécifique. Cela a inclus le développement d'une palette de pigments aux épaisseurs contrôlées, conformément aux paramètres décrits (voir description de la mire XVII$^{e}$ § 5.4.4 et Figure 111 page 133, et une limitation des valeurs spectrales à la plage de 400 à 700 nm. Malgré ces contraintes, cette étude propose une vue d'ensemble des pigments et mélanges sur l'ensemble de *La Joconde*, offrant des données inaccessibles aux méthodes traditionnelles et complémentaires aux analyses XRF et Raman.

**Proposition de palette et analyse comparée avec d'autres œuvres**

Une vue d'ensemble de la palette de *La Joconde* est présentée dans le Tableau 11 page 144, qui résume les mélanges de pigments identifiés. Les zones analysées, nommées de A à Z, sont également représentées graphiquement en Figure 114 page 145, fournissant une synthèse visuelle des pigments et des mélanges.

**En résumé**

Cette étude constitue une opportunité précieuse pour mettre à disposition des résultats spectraux complémentaires à celles obtenues par XRF et spectroscopie Raman. Bien que certaines limites inhérentes aux méthodes soient reconnues, les résultats apportent des informations nouvelles et importantes, permettant d'approfondir la compréhension des pigments et des techniques picturales de Léonard de Vinci. En proposant une vue d'ensemble inédite des pigments et mélanges présents dans *La Joconde*, cette recherche enrichit notre connaissance de l'œuvre et fournit des données précieuses pour de futures recherches dans le domaine de la conservation et de l'histoire de l'art.

**Mise en perspective avec les résultats publiés dans le catalogue du Louvre (2019)**

Avant d'analyser en détail les résultats obtenus sur *La Joconde*, il est utile de les mettre en perspective avec d'autres sources disponibles. Une série d'images de cartographie XRF, publiées dans le catalogue de l'exposition *Léonard de Vinci* au Louvre (Eveno et al., 2019), montre la répartition élémentaire du mercure (Hg), du cuivre (Cu) et du manganèse (Mn) à la surface de la peinture. Ces cartes confirment partiellement certaines des identifications proposées dans cette étude.

Toutefois, si les images sont visuellement suggestives, le commentaire qui les accompagne relève davantage d'un discours de catalogue que d'une véritable analyse scientifique. L'absence de protocole publié, de données chiffrées et de discussion critique limite la portée scientifique de ces affirmations, qui doivent être considérées avec prudence.

| Zones | Place | Principal Pigments identified |
|---|---|---|
| A | Sky | Lapis lazuli, white lead, probably on a layer of azurite |
| B | Top sky | Azurite, the azurite is mainly due to restoration |
| C | High mountains | White lead, azurite, lapis lazuli and green earth (celadonite), red oxyde |
| D | Mountains | Green earth, lapis lazuli |
| E | Lakes & river | Lapis lazuli, white lead |
| F | Rocks | Green earth, yellow ochre, lead-tin-yellow, umber earth |
| G | Valley | Yellow ochres, weld lake, brown pinke lake |
| H | Land | Red ochre or raw sienna, probably on a layer of azurite |
| I | Columns | Umber earth, buckthorn lake |
| J | Balustrade | Yellow ochres, weld lake, white lead |
| K | Around the river | Red ochre, yellow ochre, white lead, verdigris |
| L | Cover | Natural umber earth, burnt umber earth |
| M | Sleeves | Lead-tin-yellow I, white lead, ochre, buckthorn lake, copper green |
| N | Veile/Sleeve | Verdigris, buckthorn lake |
| O | Flesh | White lead, vermilion, lead-tin-yellow I, burnt umber earth |
| P | Armrest | Buckthorn lake, umber earth, ochre |
| Q | Embroiderie | Lead-tin-yellow I, vermilion, white lead, realgar, ochre, copper green |
| R | Hairs | Umber earth, raw Sienna ? probably on a layer of azurite |
| S | Lips | White lead, vermilion, lead-tin-yellow I, burnt umber earth |
| T | Iris | Natural umber, burnt umber e., vermilion, red ochre or raw sienna, black |
| U | White eye | White lead, lead-tin-yellow I, vermilion, ochre |
| V | Flesh Shadows | Burnt umber earth, vermilion, white lead, lead-tin-yellow I |
| W | Hill | Red ochre, white lead |
| X | Veile/Dress | Verdigris, white lead, Lead-tin-yellow I, red ochre or raw sienna |
| Y | Veile/Head | Umber earth, white lead, realgar |
| Z | Veile/Side | Verdigris, lapis lazuli, white lead |
| | Edge | White lead, azurite, yellow ochre, umber earth, lapis lazuli |

*Tableau 11 - Synthèse des hypothèses de mélanges de pigments identifiés et regroupés par zone d'intérêt.* © P. Cotte

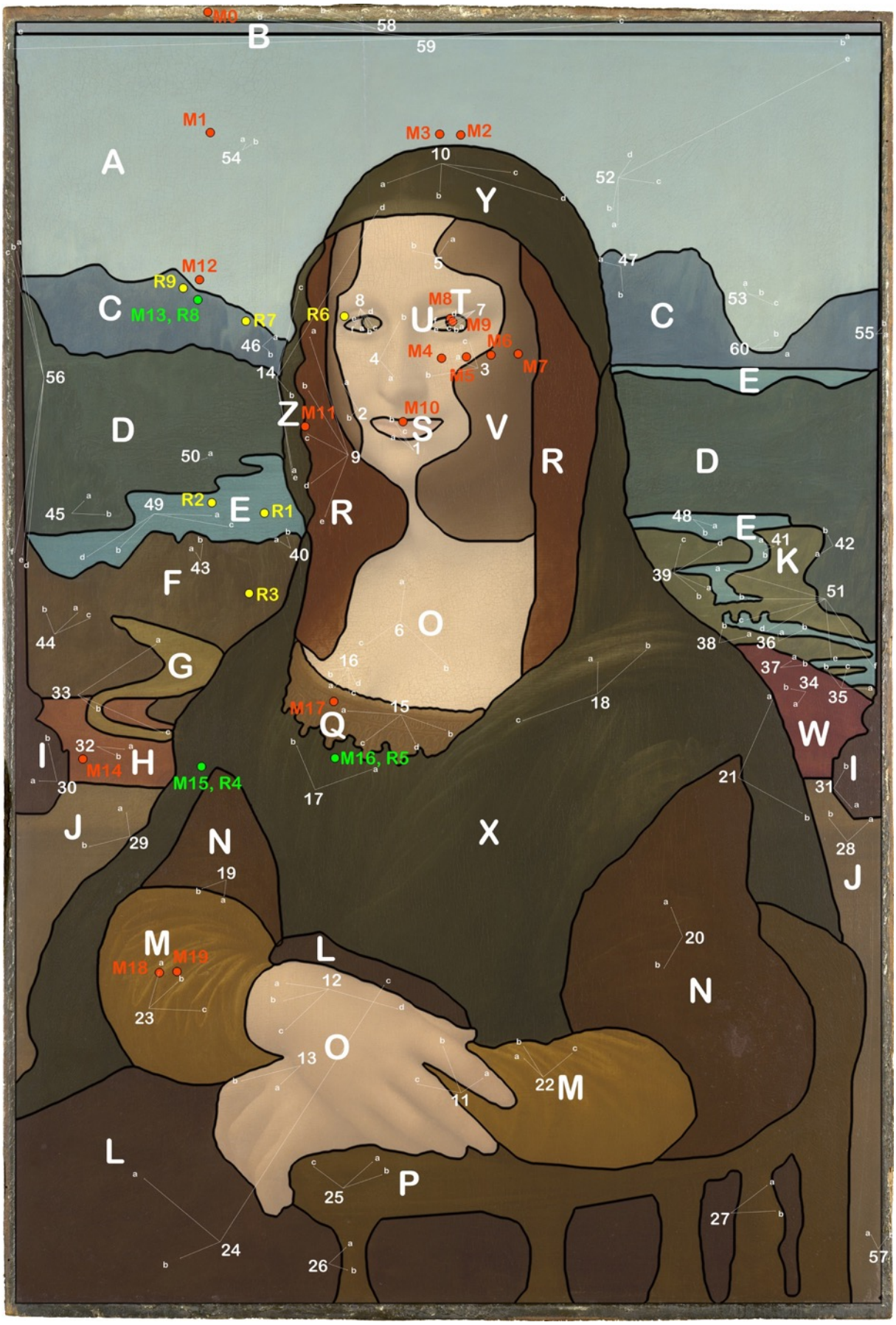



*Figure 114 - Mélanges de pigments identifiés par zone d'intérêt.* © P. Cotte

## 5.5 Les glacis sur *La Joconde*

**Introduction**

Les glacis sur *La Joconde* ont été mise en évidence dans une publication de 2008 (Elias et Cotte, 2008) grâce à l'analyse des spectres obtenus avec la caméra multispectrale. Leur présence probable avait déjà été suggérée par une observation optique et une approximation basée sur le modèle de Kubelka-Munk (Mohen, 2006) bien que cette approche ne tienne pas compte de l'effet du vernis, rendant l'interprétation moins précise. Une hypothèse de sa composition et de son épaisseur sera proposée (Viguerie et al., 2010) et les glacis seront confirmés quelques années plus tard (Walter, 2013).

La présente étude est la première application directe de recherches théoriques précédentes sur les glacis d'art, déjà publiées (Simonot, Elias et Charron, 2004) (Elias et Simonot, 2006), à une peinture réelle. Dans cette technique artistique, les pigments sont les seuls centres de diffusion. Les pigments sont dispersés de manière aléatoire avec une très faible concentration volumique (∼2%) dans un liant transparent (principalement de l'huile de lin). L'artiste ne fait que varier l'épaisseur par le nombre de couches de glacis pour moduler la luminosité et la saturation de la couleur sans ajouter de pigments blancs ou noirs, créant ainsi un rendu exceptionnel typique (Panofsky, 2010). Les recherches précédentes ont expliqué cet aspect visuel particulier en étudiant l'interaction entre la lumière et la matière, en utilisant l'équation de transfert radiatif (ETR) (Chandrasekhar, 1960) et en résolvant exactement la méthode de la fonction auxiliaire[19] (Elias et Elias, 2004). Un modèle très simple avec une fonction de phase isotrope pour chaque pigment identique, des interfaces planes et une couche de base de diffusion lambertienne a été parfaitement validé par comparaison entre la modélisation et les mesures spectrométriques bidirectionnelles sur des échantillons d'étude (Simonot, Elias et Charron, 2004). En particulier, les variations de couleur obtenues avec cette technique conduisent à un maximum de saturation qu'aucune autre méthode ne peut atteindre et qui peut être considérée comme la spécificité d'un glacis. Cette propriété a été expliquée par le calcul des différents flux lumineux dans la couche picturale, montrant que la faible concentration de diffuseurs favorise la transparence et la translucidité de la couche, permettant ainsi des réflexions multiples avec le support diffusant (Elias et Simonot, 2006).

Ici, l'intention est de mettre en œuvre le processus inverse, c'est-à-dire chercher si une technique de glacis a été utilisée dans une peinture réelle et avec quels composants, en partant des spectres de réflectance expérimentaux. Le rendu du teint de *La Joconde* constitue un sujet de recherche important en histoire de l'art (Kemp, 2006). Bien que Léonard de Vinci n'ait laissé aucun écrit détaillant sa méthode pour obtenir ces nuances de carnation, de nombreuses études ont exploré les techniques possibles et les effets de transparence dans ses glacis. Un mot en particulier, le "*sfumato*" (dérivé du participe passé du verbe italien "*sfumare*") a été créé (Cochin, 1773) pour décrire la technique de Léonard, exprimant des nuances fines et des transitions douces entre les couleurs et les tons. De nombreuses informations historiques et scientifiques laissent supposer l'utilisation d'un glacis dans le *sfumato* de Léonard (Pomarède, 1988), une technique mise au point par les primitifs flamands. À l'inverse, les artistes italiens peignaient les visages en une seule étape, en utilisant un mélange de pigments généralement composé de vermillon et de blanc de plomb. Vasari (Vasari, 1550), a expliqué que le peintre italien Antonello de Messine, après son long séjour en Flandre, a enseigné la technique du glacis à ses amis italiens. Plusieurs historiens de l'art ont ensuite suggéré un micro pointillisme (Franck, 1993) ou une stratification de couches de peinture translucides (Kemp, 2006). Cependant, la plupart d'entre eux se concentrent sur l'effet produit par la technique (Gelb, 1999; Gombrich, 2000;

[19] Développement de la fonction de phase en harmoniques sphériques afin de déduire une équation intégrale.

Arasse, 2003a). Dans le même but, de nombreux scientifiques ont contribué à une meilleure connaissance du chef-d'œuvre, se concentrant principalement sur la compréhension de l'émotion exprimée par le visage de *La Joconde* (Livingstone, 2000; Kontsevich et Tyler, 2004; Queiros-Conde, 2004). Finalement, pendant la campagne de mesures de 2004, quand la caméra multispectrale à numérisé *La Joconde*, (voir § 2.8 page 55) un scanner laser tridimensionnel (3D) haute définition utilisant une image de la profondeur codée en couleur a mis en évidence une succession de couches finement appliquées avec des épaisseurs différentes sur le visage de *La Joconde* (Blais et al., 2007).

On a vu précédemment (voir page 138) que la présence de vermillon (sulfure de mercure), de blanc de plomb (carbonate de plomb) et de terre d'ombre (oxyde de fer avec une petite quantité de manganèse) ont été identifié en travaillant sur les spectres sans vernis.

On verra par la suite la modélisation mise en œuvre page 149, en faisant appel à l'ETR et à la méthode de la fonction auxiliaire, et en utilisant les pigments identifiés avec leurs propriétés optiques et différentes hypothèses pour la couche de base. La modélisation conduit à des résultats en accord avec les spectres expérimentaux uniquement pour une couche de base donnée, qui est alors identifiée. Ainsi, on présente une nouvelle méthode non destructive pour décrire la composition des couches stratifiées et confirme l'utilisation d'une technique de glacis dans le *sfumato* de *La Joconde*. La page 153 explique le maximum exceptionnel de saturation de couleur du *sfumato* par la séparation des différents flux lumineux appliqués ici au visage de *La Joconde*.

***La Joconde* dévernie virtuellement**

Pour analyser les spectres et décrire la composition du *sfumato*, il est nécessaire de prendre en compte le vernis vieilli présent sur la peinture, qui induit un jaunissement important.

Aussi il convient d'utiliser les spectres sans vernis et les coordonnées colorimétriques calculés précédemment (voir § 5.3.1 page 120).

Pour étudier le *sfumato*, il est pertinent de se concentrer uniquement sur le visage de *La Joconde*. 11 emplacements ont été sélectionnés sur le visage (voir Figure 115a), et les spectres sans vernis correspondants sont présentés (voir Figure 115b), permettant une discrimination claire entre les spectres. Tous les autres spectres se situent entre ceux présentés et peuvent être déduits les uns des autres par une translation verticale.

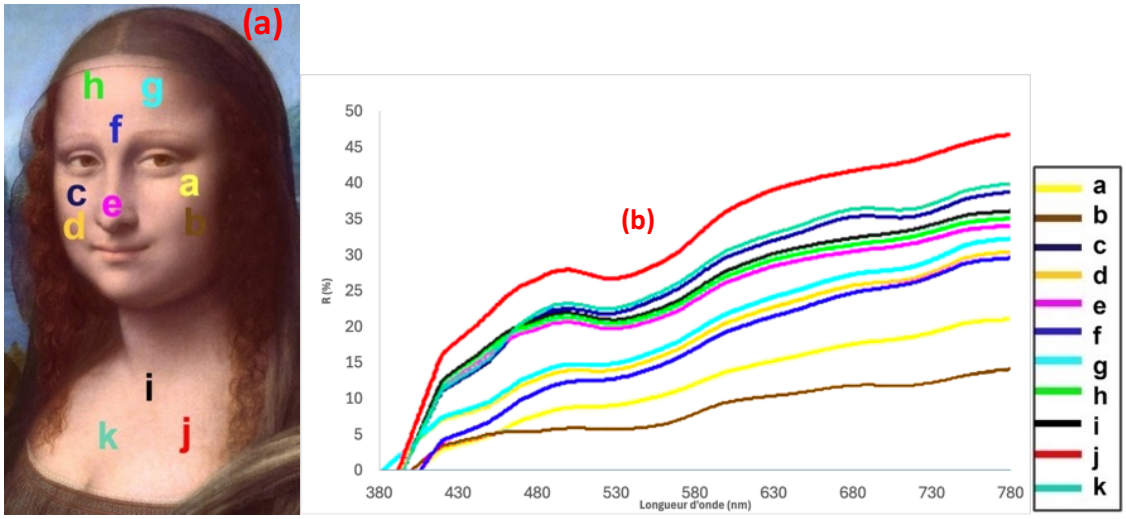



*Figure 115 - (a) 11 points de mesures dévernis sur le visage de* La Joconde. *- (b) 11 spectres de réflectance diffus*

**Identification des pigments de la couche supérieure**

Tous les spectres montrent les mêmes caractéristiques : les ruptures de pente se produisent aux mêmes longueurs d'onde et les pentes sont similaires. Cela révèle la présence de la même composition de pigments dans la couche supérieure, qui est la première condition pour supposer une technique de glacis.

L'identification du pigment a été réalisée en premier lieu à l'aide d'une base de données spectrale composée de plus de 200 pigments et colorants de référence (Dupuis, Elias et Simonot, 2002) avec une surface plane parfaite. Les meilleures correspondances sont sélectionnées numériquement en fonction de la plus faible distance des moindres carrés ε entre le spectre inconnu et les spectres de référence, en tenant compte d'une translation vers le haut due à la rugosité de la surface étudiée. La Figure 116 présente les quatre meilleures correspondances correspondant à l'endroit le plus clair (j) du visage de *La Joconde*. Cette comparaison permet d'identifier un pigment de terre d'ombre dans la couche supérieure, peut-être brûlé et provenant de Chypre, c'est-à-dire un oxyde de fer avec un faible pourcentage d'oxyde de manganèse, ce qui est en accord avec les résultats de fluorescence X (voir Tableau 10 page 140).

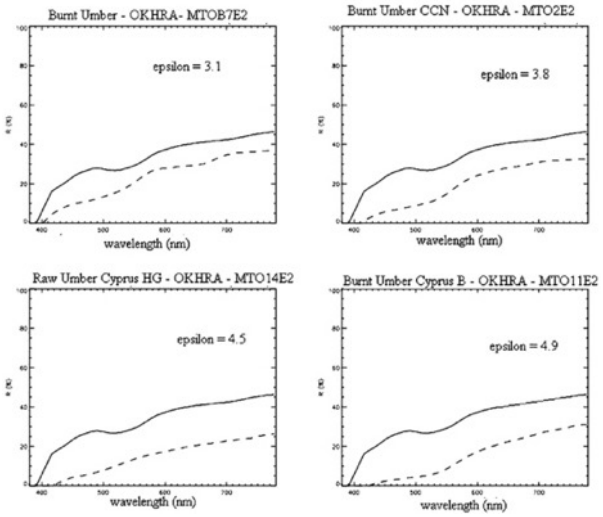



*Figure 116 - Identification du pigment de la couche supérieure de* La Joconde *correspondant au spectre sans vernis de l'emplacement (j).*
*Les quatre meilleures correspondances sont présentées avec la plus petite distance des moindres carrés ε entre le spectre inconnu (ligne continue) et ceux des pigments de référence (ligne pointillée) fournis par OKHRA (Provence).*

Pour vérifier l'hypothèse d'un mélange de vermillon et de blanc de plomb, pigments fréquemment utilisés par les peintres italiens, une autre base de données spectrale, composée uniquement de tels mélanges en différentes proportions, a été utilisée pour la comparaison numérique ; cependant, les résultats obtenus n'ont pas été concluants, comme le montre la Figure 117.

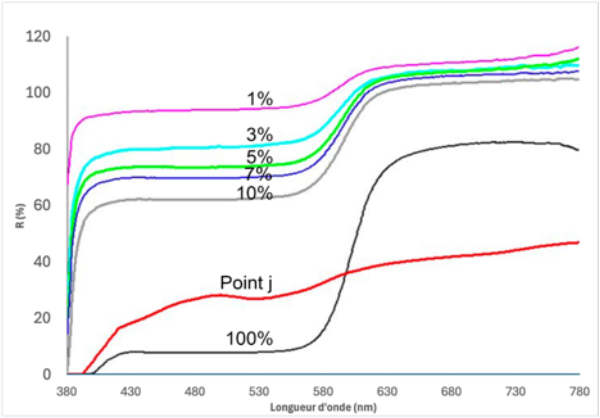



*Figure 117 - Les spectres de réflectance du mélange composé de vermillon et de blanc de plomb.*
*Les différentes concentrations volumiques de vermillon (indiquées au-dessus de chaque spectre) sont comparés au spectre précédent de l'emplacement (j) sur le visage de* La Joconde.

Enfin, comme mentionné au § 5.4.6 page 140, la même terre d'ombre a déjà été identifiée.

La présence d'un pigment unique satisfait le premier critère d'une technique de glacis dans cette couche supérieure.

**Variations colorimétriques sur le visage de *La Joconde***

Les spectres non vernis permettent également de calculer les coordonnées trichromatiques des emplacements sélectionnés (voir § 6.6.3 page-sup. - 54 -). La teinte est essentiellement due à la propriété d'absorption du pigment et présente donc peu de variation sur le visage en raison du même pigment. Les couleurs des 11 zones sélectionnées précédemment sont alors représentées par des croix dans le plan $C^*$-$L^*$ dans la Figure 118.

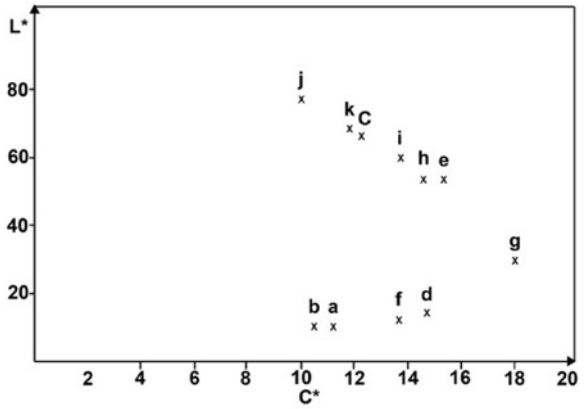



*Figure 118 - Variations colorimétriques dans les plans de chromaticité C* et de luminance L* de l'espace CIE-Lab du visage de* La Joconde*, déduites des 11 spectres expérimentaux non vernis précédents présentés dans la Figure 115b page 147.*

Cette représentation montre la présence d'un maximum très distinct de saturation de couleur sur le visage. Ce maximum et la présence d'un pigment unique (l'ombre) sont deux arguments sous-jacents à l'utilisation d'une technique de glacis dans le *sfumato*.

**Modélisation à l'aide de l'équation de transfert radiatif et de la méthode de la fonction auxiliaire**

1 - Domaine de validité de l'équation de transfert radiatif (ETR) pour l'étude des glacis

L'équation de transfert radiatif (ETR) est particulièrement appropriée pour modéliser l'interaction entre la lumière et les diffuseurs dans des milieux où la lumière reste incohérente et où les concentrations sont faibles. Ce contexte se retrouve notamment dans des peintures avec glacis, où les pigments, jouant le rôle de diffuseurs, sont exposés à de la lumière blanche. Dans ce cas, des variables scalaires peuvent être employées, et un bilan de flux peut être établi en utilisant l'ETR pour une longueur d'onde et une direction spécifiques, définies par un angle $\theta$ par rapport à la normale de l'interface ou par $\mu = \cos\theta$ . Pour une couche élémentaire de peinture d'épaisseur optique infinitésimale $d\tau$, le bilan de flux peut s'écrire :

$$\frac{dw^{\pm}(\mu,\tau)}{d\tau} = \mp\frac{w^{\pm}(\mu,\tau)}{|\mu|} \pm \frac{q}{2}\left[\left(f(\tau)+g(\tau)\right)\right] \qquad \textit{Eq. ( 17 )}$$

où $w^+$ et $w^-$ sont respectivement les flux diffusés dans les directions amont et aval. Ici, l'épaisseur optique $\tau$ est définie par l'intégrale :

$$\tau = \int_{x=0}^{z} (k+s)\,dx \qquad \textit{Eq. ( 18 )}$$

Le premier terme du côté droit de l'équation représente l'atténuation du flux diffus en raison de l'absorption et de la diffusion par les pigments, caractérisée par les coefficients d'absorption $k$ et de diffusion $s$ combinés dans l'albédo $q = \frac{s}{k+s}$. Le second terme modélise la diffusion multiple dans la direction $\mu$, en tenant compte des contributions de toutes les directions $\mu_1$. Cette diffusion est décrite par la fonction auxiliaire $f(\tau)$ dans la méthode des fonctions auxiliaires (AFM), définie par :

$$f(\tau) = \int_{\mu_1=0}^{1} [w^+(\mu_1,\tau) + w^-(\mu_1,\tau)]\frac{d\mu_1}{\mu_1} \qquad \textit{Eq. ( 19 )}$$

Le troisième terme représente la diffusion simple, où un flux collimaté $W^+$ provenant de la direction $\mu_0$ est diffusé dans la direction $\mu$ , défini par $g(\tau) = \frac{W^+(\tau)}{2\mu_0}$

La résolution par la méthode de la fonction auxiliaire conduit à une équation intégrale de Fredholm[20] pour $f(\tau)$ (Elias et Elias, 2004). Les conditions aux limites pour les interfaces air-glacis (à $\tau = 0$, avec un indice de réfraction $n$ =1,5 pour le milieu) et à la frontière entre le glacis et la base (à $\tau = h$ en tenant compte du facteur de réflectance $\rho$ de la couche de base) sont appliqués. Le flux diffus sortant de la couche de glacis est ainsi calculé pour chaque longueur d'onde, dans une configuration d'éclairage 57.5°/0° identique à celle des mesures spectrales ($\theta$ = 0° pour $\tau = 0$ et $\theta_{Brewster}$ = 57.5°). Ce calcul est effectué sur l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible, permettant ainsi de déduire le spectre de réflectance et, finalement, les coordonnées trichromatiques associées.

2 - Nécessité d'un modèle pour la couche de glacis

Le principe de l'équation de transfert radiatif (RTE) consiste à substituer la couche réelle par une couche homogène constituée d'un unique type de diffuseur, caractérisé par ses coefficients d'absorption et de diffusion $k(\lambda)$ et $s(\lambda)$, ainsi que par sa fonction de phase. Les calculs directs de ces paramètres sont complexes pour des diffuseurs non sphériques. Un modèle de couche de glacis s'avère alors nécessaire. Un tel modèle a été validé précédemment (Simonot, Elias et Charron, 2004) pour différentes couches de glacis appliquées sur des bases colorées variées et d'épaisseurs optiques distinctes, en comparant les spectres de réflectance mesurés avec les résultats issus de la modélisation. Le modèle simple d'une couche de glacis avec des interfaces planes, des diffuseurs isotropes, appliqué sur une couche de base lambertienne caractérisée par son facteur de réflectance $\rho(\lambda)$, est entièrement satisfaisant compte tenu d'une précision de 1 % pour les mesures.

3 - Caractéristiques optiques des diffuseurs

Les coefficients $k(\lambda)$ et $s(\lambda)$ de l'ombre brûlée précédemment identifiée ont été déduits de deux méthodes, toutes deux utilisant des mesures de réflectance avec un spectromètre Cary 5 et sa sphère d'intégration. La première méthode fait appel à l'équation de transfert radiatif (RTE) résolue par la méthode de la fonction auxiliaire pour deux échantillons de glacis avec des épaisseurs connues différentes mais la même composition.

La seconde utilise la méthode des deux flux pour deux échantillons de glacis de même épaisseur et composition appliqués sur un fond blanc et un fond noir (Latour, Elias et Frigerio, 2007).

Les deux méthodes aboutissent à des résultats proches, mais la seconde est plus facile à mettre en œuvre. Les variations de $k(\lambda)$ et $s(\lambda)$ de l'ombre brûlée sont présentées dans la Figure 119. Il est important de noter que ces coefficients sont proportionnels à la concentration volumique de pigment des échantillons utilisés pour leur détermination. Cette observation implique que seule l'épaisseur optique relative pourra être déduite ultérieurement par comparaison entre les spectres expérimentaux et modélisés ou les coordonnées trichromatiques.

[20] L'intégrale de Fredholm est une équation intégrale reliant une fonction inconnue à une fonction donnée à travers un noyau, utilisée pour modéliser des interactions en physique et en ingénierie, notamment dans des systèmes de diffusion.

4 - Modélisation pour différentes épaisseurs optiques

L'intensité du flux diffus calculée dans la modélisation dépendra de l'épaisseur optique de chaque couche. Pour mettre en œuvre la modélisation pour différentes épaisseurs optiques, il convient de choisir 13 couches composées chacune de 1 à 13 films identiques, chaque film ayant une épaisseur égale à 5 µm et une concentration volumique de pigment de 2 %, comme précédemment mis en œuvre (Simonot, Elias et Charron, 2004). Ces paramètres sont choisis arbitrairement pour obtenir de grandes variations d'épaisseur optique et se rapprocher de l'expérience de l'artiste.

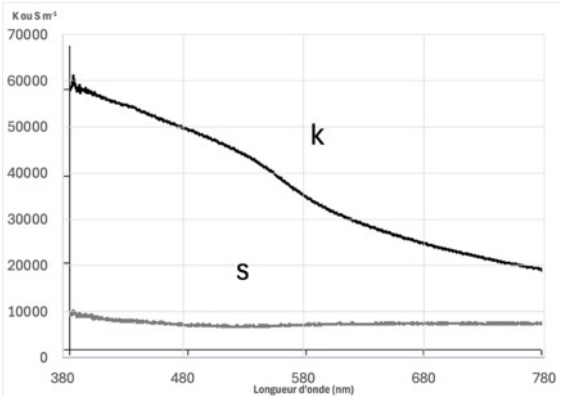



*Figure 119 - Variations spectrales des coefficients d'absorption k et de diffusion s (en $m^{-1}$) de l'ombre identifiée dans la couche supérieure du visage de* La Joconde.

L'intensité du flux diffus calculée dans la modélisation dépendra également de la couche de base. Pour cette interface, il convient de choisir des mélanges de blanc de plomb et de vermillon, et la condition aux limites fait appel au facteur de réflectance d'un mélange donné de blanc de plomb et de vermillon (Figure 117 page 148). Le même mélange est évidemment utilisé pour les 13 échantillons de glacis. Différents spectres simulés sont ensuite obtenus pour 1 à 13 couches de glacis appliquées sur la même couche de base. L'ensemble du processus est répété pour différentes concentrations de vermillon et de blanc de plomb.

5 - Comparaison des résultats simulés et expérimentaux

Les spectres de réflectance simulés sont en bon accord avec les spectres présentés dans la Figure 115b page 147 lorsque le facteur de réflectance d'une sous-couche rouge composée de 1 % de vermillon et de 99 % de blanc de plomb (voir Figure 117 page 148) est utilisé, mais trop de spectres simulés sont fournis pour être clairement présentés sur une seule figure.

Les spectres de réflectance simulés sont utilisés pour calculer les coordonnées trichromatiques correspondantes. Une méthode de *spline* est ensuite mise en œuvre pour obtenir un lissage des courbes des résultats provenant des 13 couches de glacis différentes appliquées sur la même couche de base. Les résultats colorimétriques déduits de cette modélisation sont présentés dans la Figure 120 par une ligne continue et sont en parfait accord avec les résultats précédents (les croix) directement déduits des spectres non vernis. L'évolution des coordonnées colorimétriques quand l'épaisseur augmente passe par un maximum de saturation remarquable, confirmant l'emploi de glacis. Pour d'autres proportions du mélange de pigments de la couche de base ou pour une couche de base en blanc de plomb, les courbes simulées $L^* = f(C^*)$ ne passent jamais par les résultats expérimentaux. Malheureusement, il n'est pas possible de déduire l'épaisseur réelle du glacis pour les différents emplacements (a)-(f) du visage de *La Joconde*, car seule l'épaisseur optique relative est disponible à partir de la modélisation liée à la concentration de pigment des échantillons utilisés pour déterminer $k$ et $s$, comme mentionné précédemment.

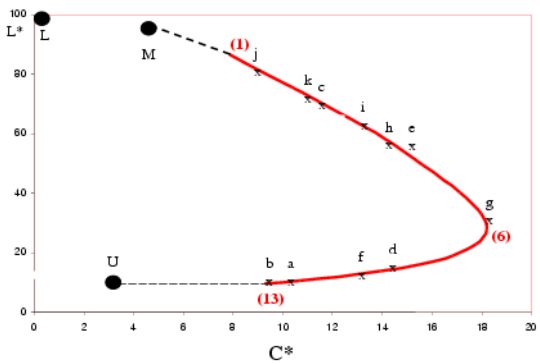



*Figure 120 - Ce diagramme représente les variations de la clarté en fonction de la saturation des couleurs du visage de* La Joconde *et montre un maximum de saturation.*

*Les résultats expérimentaux sont présentés par des croix, ceux de la modélisation par la courbe rouge. Le prolongement de la courbe passe par le point U qui caractérise la couleur d'une terre d'ombre. L'autre prolongement passe par le point M qui caractérise la couleur d'un mélange contenant 1% de vermillon et 99% de blanc de plomb constituant la composition de la sous-couche du sfumato.* © Mady Elias

## 6 - Dernières validations

L'extrapolation de la courbe modélisée pour de faibles valeurs de luminance passe de manière satisfaisante par les coordonnées colorimétriques de l'ombre pure, ce qui correspond à une couche de glacis infinie et confirme l'identification du pigment de la couche supérieure.
L'extrapolation de la courbe pour des valeurs de luminance plus élevées, correspondant à l'absence de couche de glacis, passe effectivement par la couleur d'un mélange de pigments composé de 1 % de vermillon et de 99 % de blanc de plomb, mesuré séparément sur un mélange de pigments secs. Un blanc de plomb pur, classiquement utilisé comme couche de base en Italie au XVI$^{e}$ siècle, a des coordonnées colorimétriques proches de ( $L^* = 100\ et\ C^* = 0$ ), caractéristiques d'un diffuseur presque parfait, mais qui ne correspondent pas à la courbe simulée et ne sont donc pas satisfaisantes. Il en va de même pour d'autres mélanges de blanc de plomb et de vermillon, plus concentrés en pigment rouge, qui ne conduisent pas à une modélisation pertinente.

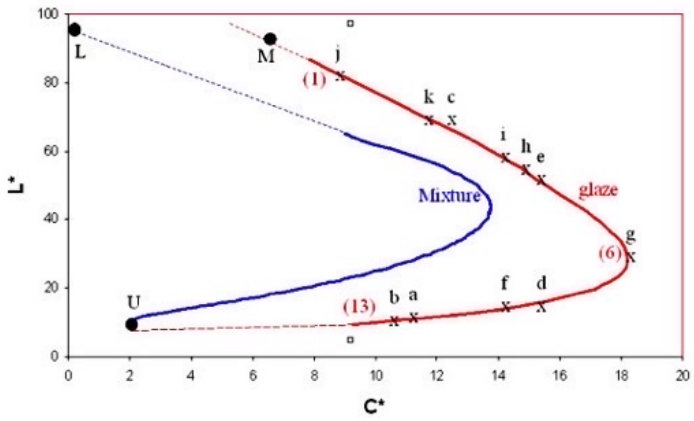



*Figure 121 - Comparaison entre les variations de couleur simulées du glacis précédent et celles d'un mélange de pigments composé de terre d'ombre et de blanc de plomb avec des proportions variables.*

On peut alors supposer que le mélange de 1 % de vermillon et de 99 % de blanc de plomb correspond à la couche de base sur laquelle le glacis est appliqué. Cette identification est en accord avec la détection de plomb et de mercure par fluorescence X, et la présente étude ajoute la composition du mélange ainsi que sa localisation dans la couche de base.

Afin d'exclure définitivement le cas d'un mélange de pigments dans la couche supérieure, la modélisation pour le cas d'un mélange de terre d'ombre et de blanc de plomb a été refaite dans diverses proportions. Les résultats colorimétriques sont présentés dans la Figure 121 et montrent clairement, comme prévu, que le maximum de saturation est inférieur à celui obtenu avec une technique de glacis.

La modélisation actuelle confirme l'existence d'une technique de glacis par le maximum de saturation. Elle confirme l'identification du pigment de la couche supérieure et ajoute l'identification du pigment de la couche de base. Utilisée avec une caméra multispectrale, l'équation de transfert radiatif (RTE) résolue par la méthode de la fonction auxiliaire s'avère être un outil innovant et puissant pour la reconnaissance non destructive des matériaux et techniques artistiques stratifiés.

**Explication du maximum de saturation**

Cette valeur du maximum de saturation explique l'apparence visuelle d'une telle peinture avec une couleur qui semble être construite dans la masse, contrairement au cas d'un mélange de pigments où la couleur semble provenir de la surface. Cette saturation exceptionnelle est due au type unique de pigment dans le glacis et peut être expliquée par la modélisation utilisant l'équation de transfert radiatif (RTE). Sa résolution par la méthode de la fonction auxiliaire permet de séparer les différentes contributions au flux diffus sortant de la couche de peinture. Les trois flux dus à la diffusion simple, à la diffusion multiple et à la diffusion par la couche de base peuvent alors être calculés séparément. Cette décomposition ne peut pas être obtenue directement par des expériences, mais seulement par l'utilisation de la modélisation. Ces calculs ont déjà été réalisés pour des échantillons d'étude de glacis à base d'oxyde de chrome. On applique ici le même processus au visage de *La Joconde* pour présenter uniquement les résultats des calculs, qui peuvent être trouvés dans un article précédent (Elias et Simonot, 2006).

Le flux diffus provenant de la couche de peinture dans la direction μ pour τ = 0, qui est la solution de l'équation Eq. ( 17 ) page 149, peut être écrit comme la somme de trois termes :

$$w^{-}(\mu,0) = w_{ss}^{-}(\mu,0) + w_{ms}^{-}(\mu,0) + w_{B}^{-}(\mu,0). \qquad \textit{Eq. ( 20 )}$$

La signification de ces trois termes est schématisée dans la deuxième colonne de la Figure 122.

Le premier terme correspond à la lumière subissant une seule diffusion avant de sortir de la peinture. Le deuxième terme correspond à la lumière subissant des diffusions multiples avant de sortir de la peinture. Dans ces deux termes, la lumière est uniquement diffusée par les pigments et n'atteint jamais la couche de base. Le troisième terme correspond à la lumière diffusée par la couche de base. Cette lumière peut subir une ou plusieurs diffusions avant ou après avoir atteint la couche de base. Le flux global, sortant dans l'hémisphère supérieur et normalisé par le flux incident, est finalement calculé pour les trois cas.

La troisième colonne de la Figure 122 présente les trois flux globaux diffusés par les 13 couches de glacis composées d'un pigment de terre d'ombre appliqué sur un mélange de 1 % de vermillon et 99 % de blanc de plomb en couche de base. La diffusion unique (voir Figure 122 (a)) augmente avec le nombre de diffuseurs et donc avec le nombre de couches. La diffusion multiple (voir Figure 122 (b)) augmente jusqu'à trois couches, puis diminue. Sa variation souligne sans aucun doute l'origine du maximum de saturation. De plus, on retrouve la forme d'un spectre de terre d'ombre. Enfin, la lumière diffusée par la couche de base diminue [voir Figure 122 (c)] lorsque le nombre de couches augmente, car la couche de base est de moins en moins atteinte par la lumière incidente. La forme du spectre correspondant à un mélange de 1 % de vermillon dans du blanc de plomb (voir Figure 117) est reconnaissable uniquement pour une ou deux couches de glacis. Les valeurs élevées du flux sortant dans la Figure 122 (c), comparées à celles des Figure 122 (a) et (b), montrent que la plupart de la lumière atteint la couche de base en fonction de la transparence des couches de glacis.

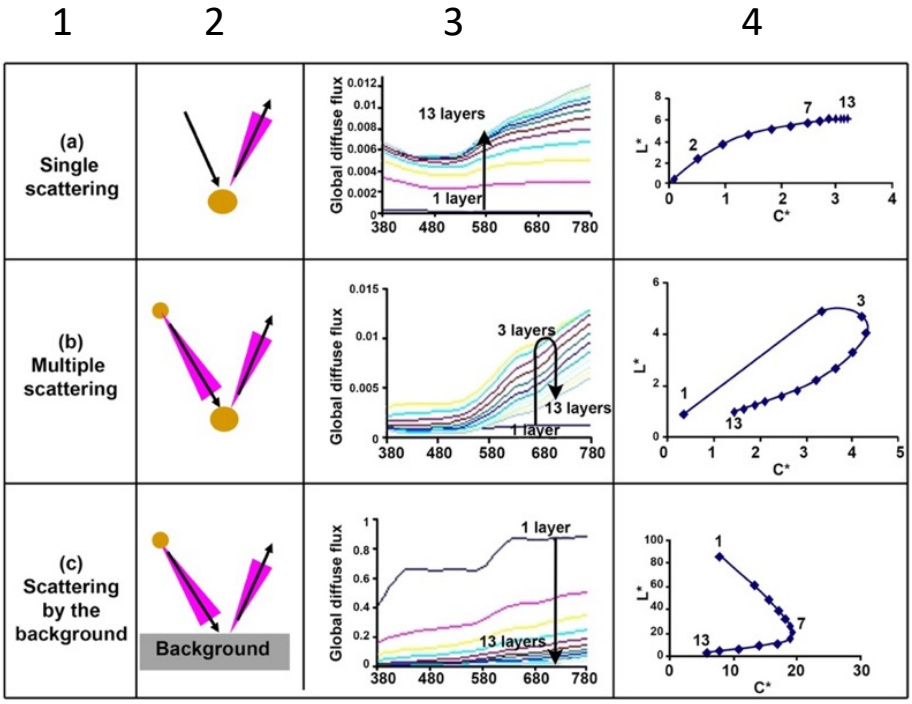



*Figure 122 - Trois contributions à la diffusion globale provenant du flux lumineux.*
*(a) diffusion unique, (b) diffusion multiple, (c) diffusion par le fond.*
*Colonne 3 : En fonction du nombre de couches de glacis pour une ombre incrustée dans un liant à l'huile et appliquée sur une couche de base composée de 1 % de vermillon et de 99 % de blanc de plomb.*
*Colonne 4 : Variations colorimétriques dans les plans de chromaticité C* et de luminosité L* de l'espace CIE-Lab en fonction du nombre de couches de glacis pour chaque contribution à la lumière diffuse.*

Les couleurs correspondantes, calculées dans l'espace CIE-Lab, sont présentées dans la Figure 122 Colonne 4 dans le plan $C^* - L^*$. Malheureusement, les coordonnées trichromatiques ne sont pas additives, et la somme de ces trois courbes ne peut pas être utilisée pour retrouver les variations globales de couleur présentées dans la Figure 120. Lorsque la lumière diffusée par les pigments [voir Figure 122 (a) et (b)] est complètement séparée de la lumière diffusée par la couche de base [voir Figure 122 (c)], il est clairement montré que le maximum de saturation est dû à la diffusion multiple et non à la diffusion simple. Le dernier composant montre également une valeur maximale de saturation moins prononcée, encore une fois due à la diffusion multiple par les pigments avant et après la diffusion par la couche de base.
Ces résultats expliquent que la diffusion multiple par les pigments faiblement concentrés contenus dans la couche supérieure est l'origine principale de l'exceptionnel maximum de saturation et que la diffusion simple ne contribue pas à ce maximum. Cela souligne le filtrage spectral de chaque pigment, qui s'améliore avec le nombre d'interactions entre la lumière et le pigment. La diffusion multiple favorise clairement la pureté de la couleur, la diffusion simple étant largement insuffisante pour cela. Ce filtrage spectral par les pigments colorés est moins efficace pour les couches constituées de mélanges de pigments, où la diffusion multiple est moins importante en raison de la présence de pigments blancs dans le milieu, ce qui explique la valeur maximale de saturation plus faible dans ce cas.

**En résumé sur les glacis**

Les spectres de réflectance diffuse enregistrés par une caméra multispectrale après un retrait virtuel du vernis prouvent que le *sfumato* de *La Joconde* est constitué d'un seul pigment avec une faible concentration en volume, une terre d'ombre, très courant en Italie au 16$^{e}$ siècle. Ces mêmes spectres permettent le calcul des coordonnées trichromatiques dans l'espace CIE-Lab et mettent en évidence une valeur maximale élevée de la saturation des couleurs sur l'ensemble du visage. Ces critères attestent de l'utilisation d'une technique de glacis inspirée des primitifs flamands tels que Van Eyck et Van Der Weyden, où les modulations de la couleur sont réalisées en variant le nombre de couches sans ajouter de pigment blanc. Le maximum de saturation est confirmé par la modélisation utilisant l'équation de transfert radiatif (RTE), résolue par la méthode de l'approximation de flux asymptotique (AFM). L'accord satisfaisant entre la modélisation et les expériences prouve également que la couche de base est constituée d'un mélange de 1 % de vermillon et de 99 % de blanc de plomb. Enfin, l'AFM explique l'exceptionnel maximum de saturation en séparant les différentes origines de la diffusion de la lumière. Le rendu typique du *sfumato* est alors optiquement expliqué par la prédominance de la diffusion multiple, favorisée par la faible concentration d'un seul type de pigment dans un milieu translucide.

Associée à une caméra multispectrale, la RTE résolue par l'AFM s'est avérée être un outil innovant et puissant pour la reconnaissance non destructive des matériaux artistiques stratifiés et des techniques artistiques. Jusqu'à présent, tous les résultats ne pouvaient être obtenus que par un échantillonnage destructif. Dans le cas de *La Joconde*, la combinaison des deux techniques a permis de reconnaître une technique de glacis et d'identifier les pigments de la couche supérieure et de la couche de base. C'est la première fois que la modélisation utilisant le transfert radiatif et la résolution du problème inverse est appliquée au domaine des œuvres d'art, même si elle est désormais utilisée en optique atmosphérique, en astrophysique, en océanographie et en climatologie. Dans un avenir proche, le processus sera systématisé en utilisant de grandes bases de données de coefficients d'absorption et de diffusion des pigments de référence ainsi que des spectres de réflectance des couches de base classiques.

Les nombreuses hypothèses précédentes concernant l'utilisation d'une technique de glacis dans le *sfumato* de Léonard de Vinci sont désormais attestées expérimentalement et théoriquement. Il reste à réaliser des études similaires sur d'autres peintures de Léonard, telles que le portrait de *La Dame à l'Hermine* peint en 1490 (Musée Czartoryski de Cracovie) ou le portrait de *Ginevra de' Benci* peint vers 1479 (National Gallery of Art, Washington, D.C.), pour vérifier la présence d'un *sfumato* avant *La Joconde*. Les résultats pourraient généraliser le terme "*sfumato*" actuellement utilisé pour décrire la technique de Léonard.

## 5.6 Autres dessins préparatoires sur *La Joconde*

Si les dessins préparatoires ne présentent pas de traces de *spolvero*, comme ceux exposés ci-après, on peut supposer que Léonard de Vinci les a réalisés directement sur la couche de préparation. Grâce à la méthode L.A.M., ces dessins préparatoires deviennent visibles en divers endroits de *La Joconde* ; voici quelques-uns des exemples les plus évidents.

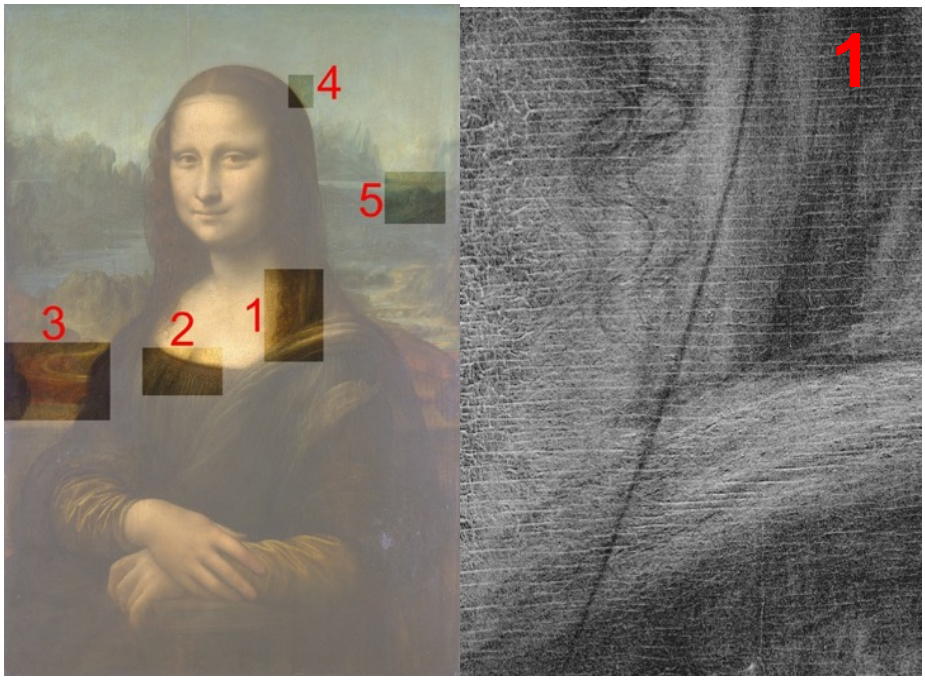



*Figure 123 - Emplacements de quelques exemples de dessins préparatoires (←)*
*Figure 124 - (1) Une ligne noire, presque verticales dessine le bord d'un ancien voile (→)© P. Cotte*

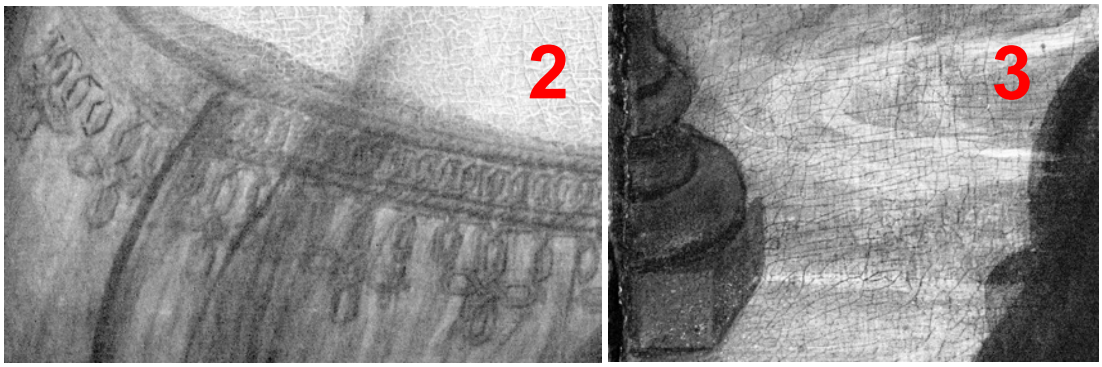



*Figure 125 - (2) Dessins d'entrelacs et de broderies au bord du décolleté de la robe (←)© P. Cotte*
*Figure 126 - (3) Dessin de la construction du pied de la colonne de gauche (→)© P. Cotte*

Il est important de noter que le dessin préparatoire représentant le bord d'un voile sur l'épaule (voir Figure 124 (1) et emplacement Figure 123, zone (1)) correspond à la mode vestimentaire florentine du début des années 1500. Cependant, cet élément ne semble pas lié à la version actuelle de *La Joconde* et appartient plus vraisemblablement à une composition antérieure.

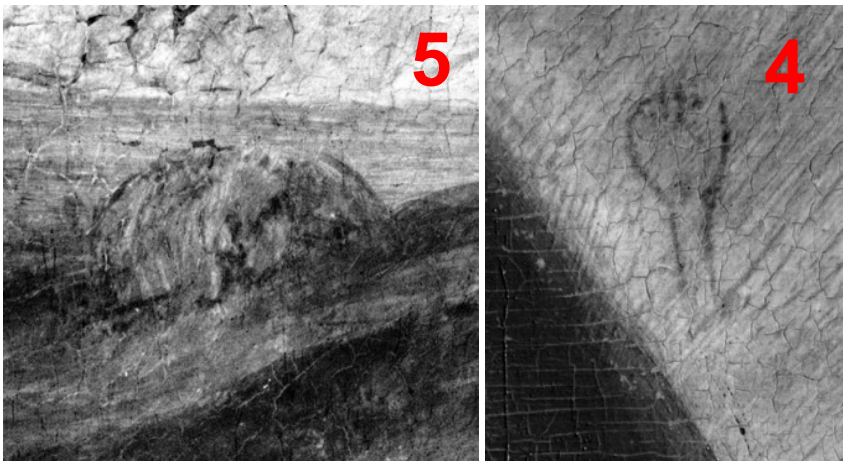



*Figure 127 - Un dessin en forme de dôme, dans le paysage de montagnes (5) (←)* © P. Cotte
*Figure 128 - Un dessin d'aiguille à cheveux (4) (→)* © P. Cotte

Des dessins préparatoires apparaissent également dans des endroits inattendus, tels qu'un dessin de tête d'aiguille à cheveux (voir Figure 128 (4) et emplacement Figure 123
Figure 123, zone (4)) qui sera étudié plus en détails (voir Figure 139 page 165), ainsi qu'une forme de dôme visible dans le paysage montagneux (voir Figure 127 (5) et emplacement Figure 123, zone (5)).

## 5.7 Autres techniques picturales

Dans l'exécution de *La Joconde*, Léonard de Vinci a intégré des procédés innovants pour affiner et faire évoluer sa composition. Parmi ces techniques, des croix ont été marquées dans les yeux, probablement utilisées comme repères pour assurer une construction précise et harmonieuse du regard. L'usage des doigts, contribuant à adoucir les transitions et à créer le célèbre effet de *sfumato*. En parallèle, le grattage - une technique inédite chez Léonard jusqu'alors - et le hachurage sont employés pour réaliser des corrections ou des repentirs, permettant d'ajuster et de perfectionner l'œuvre. Ces interventions illustrent la maîtrise technique exceptionnelle de Léonard et sa quête inlassable de perfection artistique.

### 5.7.1 Les croix dans les yeux

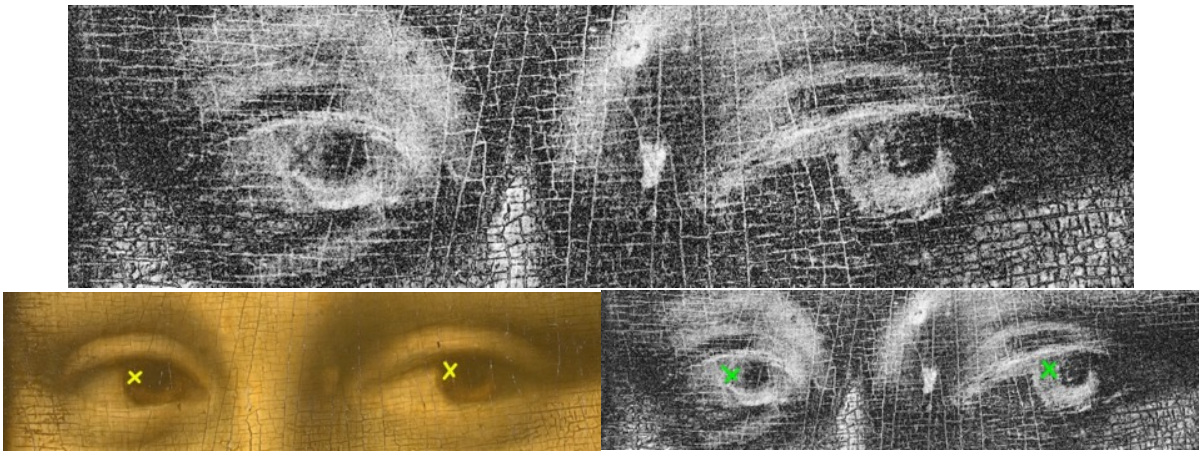


*Figure 129 - Dessins de deux croix aux centres des yeux, retrouvés avec les images L.A.M.* © P. Cotte

Il est inhabituel de trouver des croix de positionnement pour les yeux dans les dessins préparatoires des œuvres de Léonard de Vinci, et plus largement dans les peintures contemporaines à *La Joconde*. Dans ce cas, cependant, il est important de noter qu'on observe deux croix en forme de "X", et non des "+", et que celles-ci ne coïncident pas avec le centre des pupilles. Ce constat est surprenant, d'autant plus qu'aucun élément de ce type n'a été trouvé dans les portraits de *La Dame à l'Hermine* ou de *La Belle Ferronnière*, pourtant étudiés avec la même caméra multispectrale. Cette observation singulière soulève donc plusieurs questions.

En l'absence d'éléments comparatifs, nous ne pouvons pour l'instant qu'émettre des hypothèses quant à la fonction de ces marques uniques dans *La Joconde*. L'une des hypothèses avancées est que ces croix pourraient indiquer des points spécifiques de rotation ou de mouvement des yeux, ou encore le centre de l'œil là où l'écartement des paupières est maximal. Une autre possibilité serait que ces croix signalent une position différente des yeux, avec un regard orienté vers la droite, suggérant ainsi qu'elles appartiennent à un projet de composition antérieur de l'œuvre, en lien avec d'autres découvertes faites dans cette thèse.

Les croix en "X" pourraient également avoir été utilisées par Léonard pour aligner d'autres éléments essentiels du visage avec précision, notamment les muscles sous-jacents, invisibles, qui influencent l'expression faciale. Par exemple, les muscles zygomatiques majeurs ou le risorius, impliqués dans les mouvements des lèvres et du sourire, pourraient être reliés à ces repères. Ces croix pourraient ainsi constituer des points de référence pour positionner et équilibrer l'action musculaire, assurant ainsi la cohérence et l'harmonie des expressions faciales. Elles pourraient également indiquer le point culminant de l'arcade sourcilière, là où elle atteint son maximum de hauteur ou de courbure, assurant une symétrie précise entre les deux côtés du visage.

Un autre point possible d'alignement serait les ailes du nez, là où celui-ci s'élargit vers les joues, afin de capturer la structure du visage et de gérer les jeux d'ombre et de lumière. En outre, ces croix pourraient avoir servi à déterminer des points de perspective essentiels, comme des lignes de construction ou des points de fuite, contribuant à orienter l'ensemble de la composition dans l'espace. Enfin, il est possible que Léonard les ait utilisées pour aligner les tempes ou la racine des cheveux, afin de maîtriser les proportions exactes de la tête.

Grâce aux images obtenues par la méthode L.A.M., cette découverte offre ainsi de nouvelles perspectives sur les méthodes de travail de Léonard de Vinci. Elle révèle non seulement son processus d'expérimentation et son souci du détail dans le traitement du regard, mais aussi son approche complexe et réfléchie de la structuration du visage dans ses portraits. Les croix en "X" témoignent peut-être d'une technique sophistiquée visant à capturer la dynamique des expressions et à analyser la relation entre les différentes parties du visage. Cette analyse ouvre donc la voie à de nouvelles pistes de réflexion, que les historiens de l'art pourront explorer davantage pour valider ou approfondir les hypothèses exposées ici.

### 5.7.2 L'usage des doigts de l'artiste

L'usage des doigts pour peindre est une pratique moins courante, néanmoins bien documentée dans l'histoire des techniques picturales (Wadum, 2002; Roy, Spring et Plazzotta, 2004; Wolfthal, 2006; Currie et Allart, 2012).

On trouve des empreintes dans les œuvres des élèves de Léonard, ainsi que dans celles produites par son atelier, par ses suiveurs, par les membres de son académie et par les artistes de son école (Matteucci et al., 2015a).

*Figure 130 - Traces digitales,* Adoration des Mages. *© Musée des Offices. Florence.*

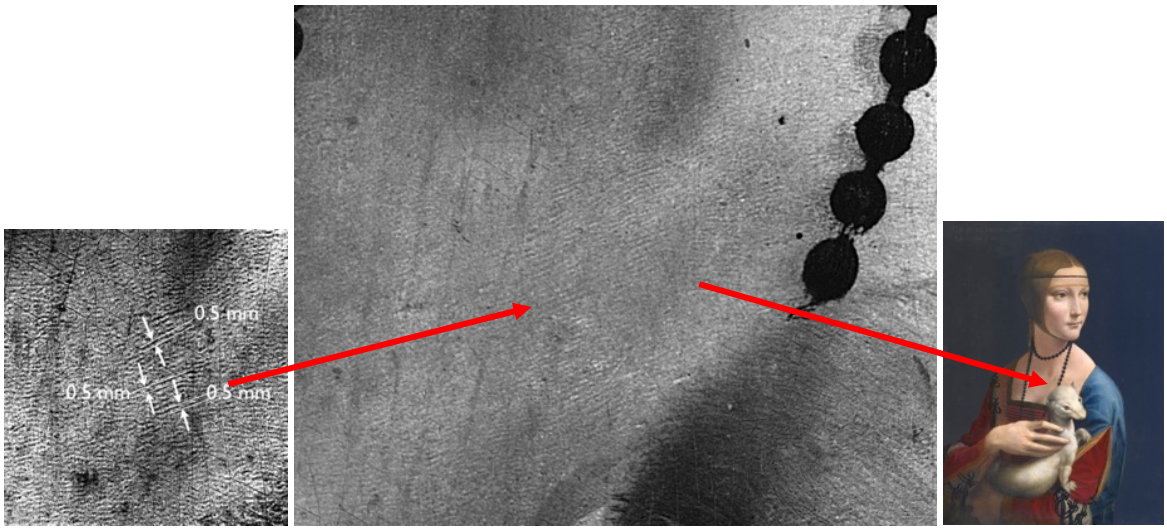



*Figure 131 - Traces digitales,* La Dame à l'Hermine*, Musée Czartoryski, Cracovie - Détail mesures interlignes.* *© P. Cotte*

*Figure 132 - Traces digitales,* La Belle Princesse*, Collection Suisse.* *© P. Cotte*

Les empreintes connues dans les œuvres de Léonard de Vinci se retrouvent notamment dans les peintures inachevées de *Saint Jérôme* à la Pinacothèque du Vatican (Syson et Billinge, 2005) et dans *L'Adoration des Mages* au Musée des Offices à Florence (Ciatti et Frosinini, 2018) (voir Figure 130). Mais aussi dans le portrait de *Ginevra de' Benci* à la National Gallery de Washington (Bull, 1992), dans *La Dame à l'Hermine* au Musée Czartoryski à Cracovie (Cotte, 2014) (voir Figure 131) et dans *La Belle Princesse*, collection Suisse (Kemp et Cotte, 2012) (voir Figure 132).

Sur le plan technique, lors de la phase préparatoire, Léonard de Vinci utilise ses doigts pour étaler la peinture. À mesure que l'œuvre progresse, l'usage des doigts devient plus rare, et dans la phase finale, les empreintes se limitent à de légers mouvements, utilisés pour créer des nuances subtiles dans les zones d'ombre délicates ou des dégradés presque imperceptibles.

Jusqu'à récemment, aucune empreinte digitale n'avait été observée sur *La Joconde*. Cependant, la technique d'analyse avec les images L.A.M. a révélé la présence de traces de doigt sur le cou (voir Figure 133) et entre les mains de *La Joconde* (voir Figure 134).

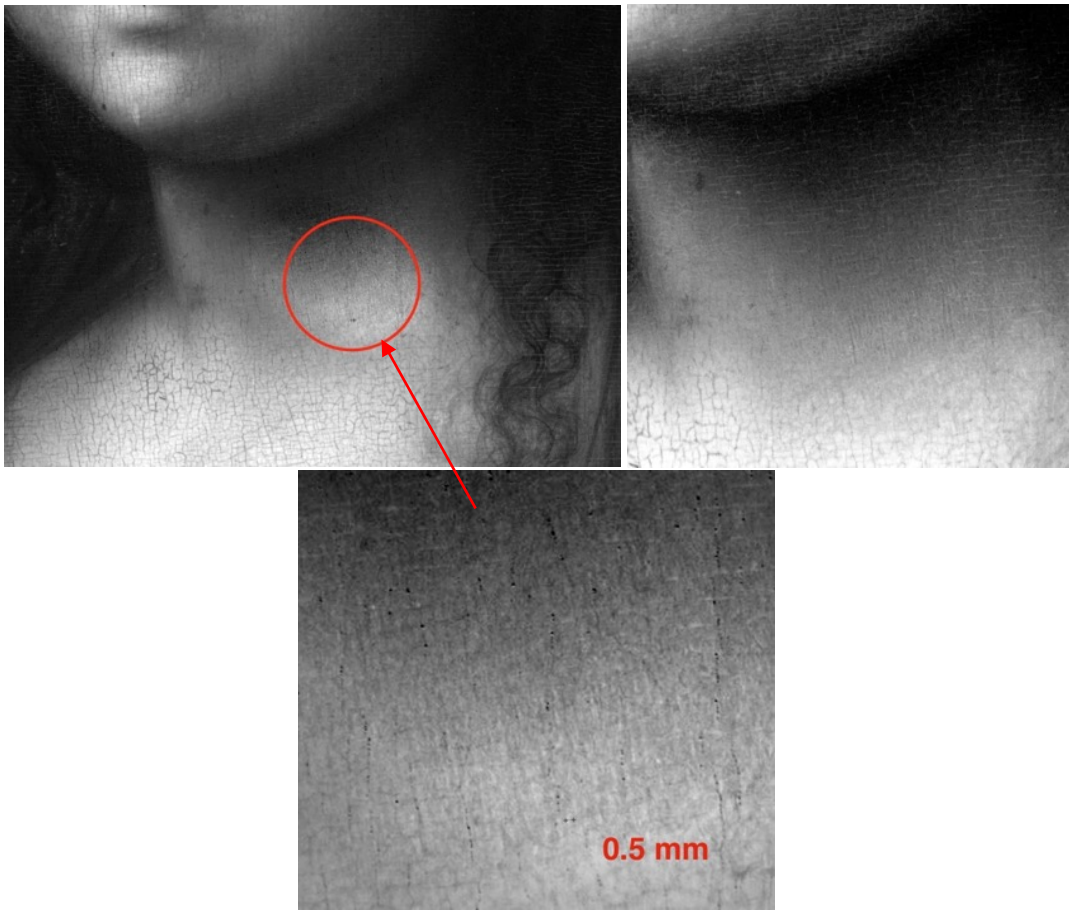



*Figure 133 - Traces digitales retrouvées sur le cou de* La Joconde *avec les images L.A.M.* © P. Cotte
*Les lignes dactyloscopiques parfaitement parallèles espacées régulièrement de 0,48 à 0,51 mm*

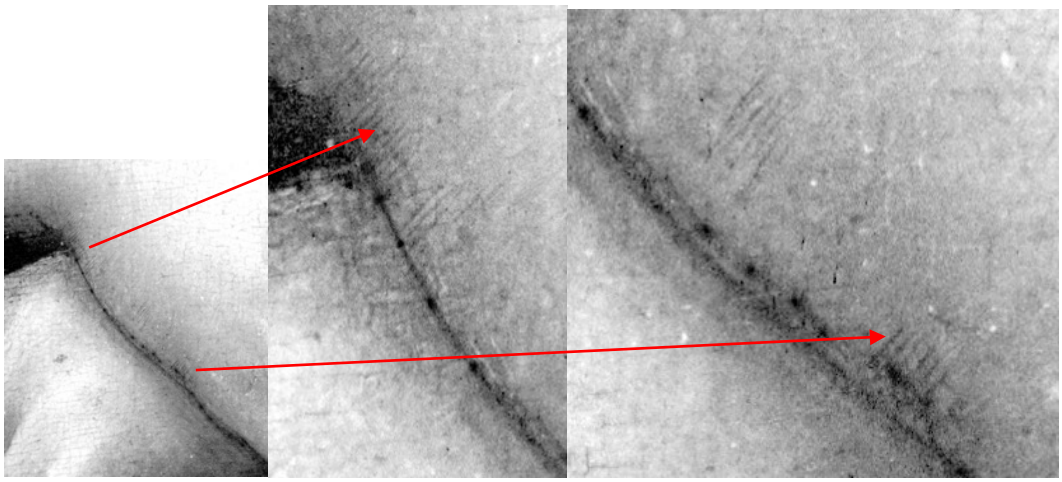


*Figure 134 - Traces digitales retrouvées entre les deux mains de* La Joconde *avec les Images L.A.M.* © P. Cotte

Les lignes parallèles, espacées régulièrement de 0,48 à 0,51 mm, témoignent sans équivoque de leur origine dactyloscopique et correspondent à la technique utilisée par Léonard de Vinci lors de la phase finale pour traiter les transitions entre ombre et lumière. Sur le cou, (voir Figure 133) les empreintes digitales couvrent presque toute la largeur. Leur netteté, et peut-être plus encore leur transparence, suggèrent qu'elles ont été appliquées sur une surface dure et sèche : elles recouvrent, sans ambiguïté, un réseau de craquelures bien antérieur.

### 5.7.3 La méthode de grattage

Lorsqu'un artiste souhaite modifier significativement une composition ou effacer partiellement une peinture inachevée, il peut choisir de recouvrir la zone à supprimer. Cependant, cette méthode nécessite l'application d'une couche épaisse et opaque de peinture, risquant malgré tout de laisser transparaître des éléments sous-jacents. Dans un contexte où certains pigments sont rares et coûteux, l'option la plus efficace demeure l'élimination complète de la partie indésirable. Toutefois, après un délai de séchage de six mois à un an, lorsque la peinture à l'huile devient sèche et dure, il est difficile de retirer une zone sans compromettre l'intégrité de l'ensemble. L'utilisation de solvants, tels que la térébenthine, s'avère imprécise et présente des risques de détérioration. Après plusieurs années, la couche picturale se transforme en une croûte encore plus dure et craquelée, compliquant davantage toute tentative d'intervention. Si la peinture est vernie, cette complexité s'accroît. Dans de tels cas, il est souvent préférable de changer de support, mais une planche de bois préparée à peindre est un matériau précieux, long et coûteux à obtenir. Dès lors, la réutilisation du support s'impose comme la solution la plus rapide, simple, économique et efficace.

Léonard de Vinci, conscient de ces contraintes, utilise une méthode de grattage (ou griffage) pour éliminer partiellement et en profondeur la zone indésirable à l'aide d'une pointe dure. Cette méthode présente l'avantage de créer une surface rugueuse, propice à l'application d'une nouvelle couche de peinture, tout en réduisant l'épaisseur de la couche existante.

**Grattage (ou griffage) dans le ciel de *La Joconde* (Cotte, 2015)**

À notre connaissance, aucune source antérieure ne documente l'usage d'une méthode de grattage par Léonard de Vinci pour effacer une peinture sèche. Cette observation repose sur notre analyse directe des images L.A.M., offrant une nouvelle perspective sur les pratiques de Léonard. Le grattage est un moyen bien connu des artistes pour éliminer un détail sur une peinture sèche. Ainsi, bien que cette

méthode soit jusqu'à présent inédite dans l'œuvre de Léonard, son utilisation n'est pas surprenante en soi.

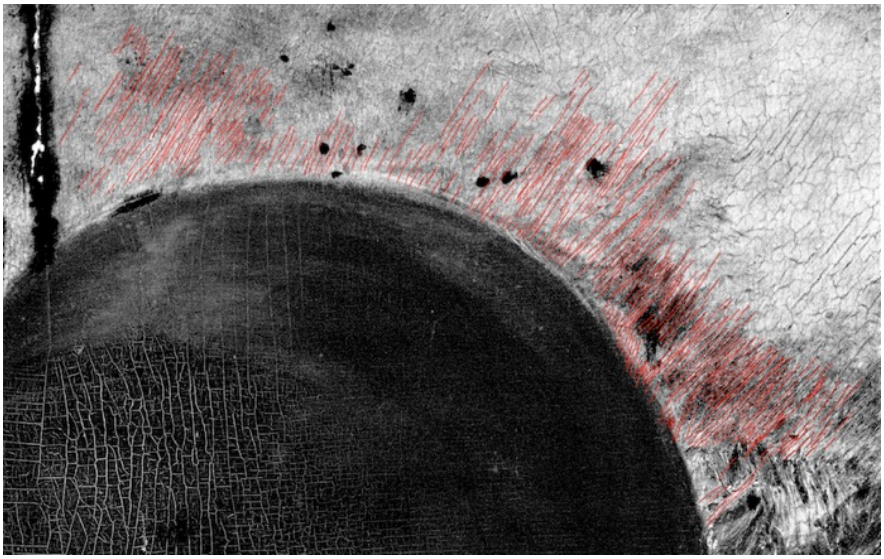


*Figure 135 - Sillons de grattage (en rouge) dans le ciel de* La Joconde © P. Cotte

Sur les images L.A.M., les sillons de grattage dans le ciel à droite de la tête de *La Joconde* se distinguent clairement et sont facilement reconnaissables : ils sont caractéristiques par leur régularité, leur longueur (de 3 à 20 millimètres environ), serrés et parallèles, contrairement aux craquelures. Les sillons, dessinant un ensemble au contour flou, témoignent indirectement des intentions de Léonard en montrant l'emplacement et la forme des éléments qu'il supprime, une composition antérieure décrite au § 5.8.1, page 165. La même observation a été faite dans *La Dame à l'Hermine* pour agrandir le corps de l'hermine (Cotte, 2014, pp. 186-187).
Les sillons sont orientés sur une diagonale sud-ouest/nord-est, une direction qui serait naturellement adoptée par un droitier. Cependant, Léonard de Vinci étant gaucher, la position de la tête de *La Joconde* a probablement nécessité l'utilisation de sa main droite, ce qui pourrait indiquer une certaine ambidextrie. Certaines irrégularités dans l'exécution des sillons suggèrent néanmoins qu'il n'était peut-être pas aussi habile de cette main, à moins que ces irrégularités ne résultent de points d'accrochage mécanique. Dans cette partie du ciel, les sillons produits par le grattage ont été remplis de pigments de lapis-lazuli et de blanc de plomb.

**Sillons ou hachures d'ombre ?**

Il faut distinguer les sillons de grattage des hachures d'ombre, souvent observées dans les dessins préparatoires de Léonard de Vinci. Contrairement aux sillons, qui résultent d'une intervention mécanique a posteriori, les hachures d'ombre sont créées par l'application de pigments dans le cadre du processus créatif, lorsque la peinture est encore à l'état d'ébauche. Avec le temps, ces hachures peuvent développer des craquelures en raison du vieillissement naturel des matériaux. En revanche, les sillons de grattage, exécutés sur une couche de peinture durcie et vieillie, ne présentent aucune craquelure, comme le montre l'image ci-contre (voir Figure 136).

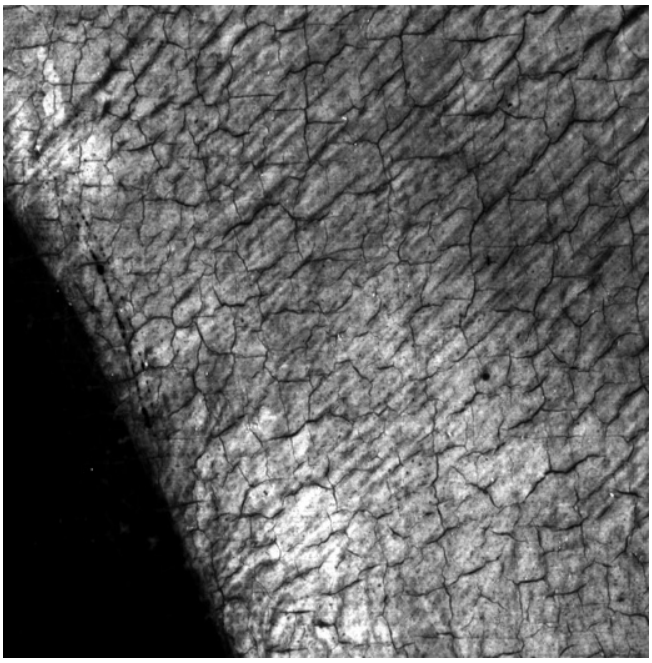


*Figure 136 - Sillons et craquelures dans le ciel de* La Joconde *au bord de la tête* © P. Cotte

Sur cette image, l'attention doit être portée sur les longs traits blancs (ou plus clairs), qui marquent des sillons orientés suivant un axe sud-ouest/nord-est. On observe que le réseau de craquelures (noir), très désorienté et irrégulier, ne suit pas les sillons de grattage. En effet, ce réseau de craquelures ne perturbe en rien la continuité des sillons, qui demeurent intacts et alignés. Si les craquelures avaient affecté les sillons, il serait attendu que ceux-ci présentent des déplacements ou des interruptions dans leur tracé. Cette observation démontre que les sillons résultent d'une intervention intentionnelle et postérieure au séchage de la peinture, tandis que les craquelures relèvent d'un processus de vieillissement naturel. Cette distinction est essentielle pour la compréhension des techniques picturales de Léonard de Vinci, et elle contribue à différencier les altérations intentionnelles de l'artiste des phénomènes de dégradation spontanée des matériaux au fil du temps.

### 5.7.4 Les hachures de reprises

Parmi les reprises de la peinture identifiées grâce à l'imagerie infrarouge traditionnelle, deux se distinguent par une particularité technique inhabituelle.

• Sur les images L.A.M. de la main gauche (voir Figure 137), de fines hachures, mesurant quelques millimètres, suivent avec précision le contour inférieur de la première phalange de l'index. Contrairement à leur fonction habituelle dans les dessins de Léonard, où elles servent principalement à ombrer les formes, ces hachures peuvent ici soit fixer l'anatomie, soit créer une transition, soit indiquer une zone à effacer.

Une séquence vidéo illustrant ce calcul est disponible en annexe numérique : Lien-Vidéo
(https://youtu.be/gxGfoaFqpJ0)

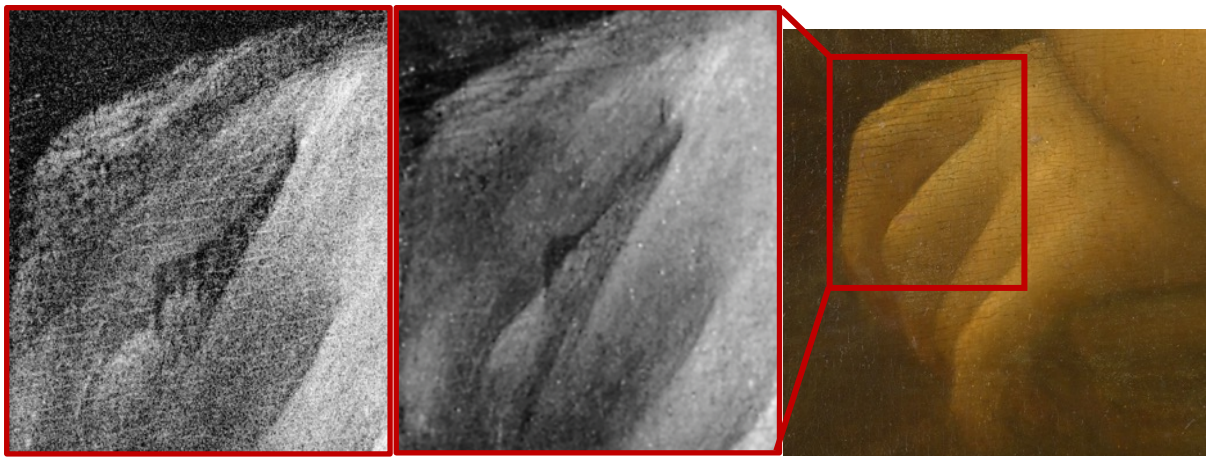


*Figure 137 - Détails de la main gauche de* La Joconde *qui montre la correction de l'index et du majeur : (←) Image L.A.M. qui montre les hachures situées sous la première phalange de l'index ; (centre) Image infrarouge 2000 nm* © Louvre *; (→) Image couleur.* © P. Cotte

• D'autres hachures (voir Figure 138), à peine perceptibles en couleur sur le contour supérieur de la tête de *La Joconde*, deviennent clairement visibles grâce aux images L.A.M. Leur fonction semble être de créer une transition subtile et de dissimuler l'ancien contour, ce dernier étant observable par imagerie infrarouge.

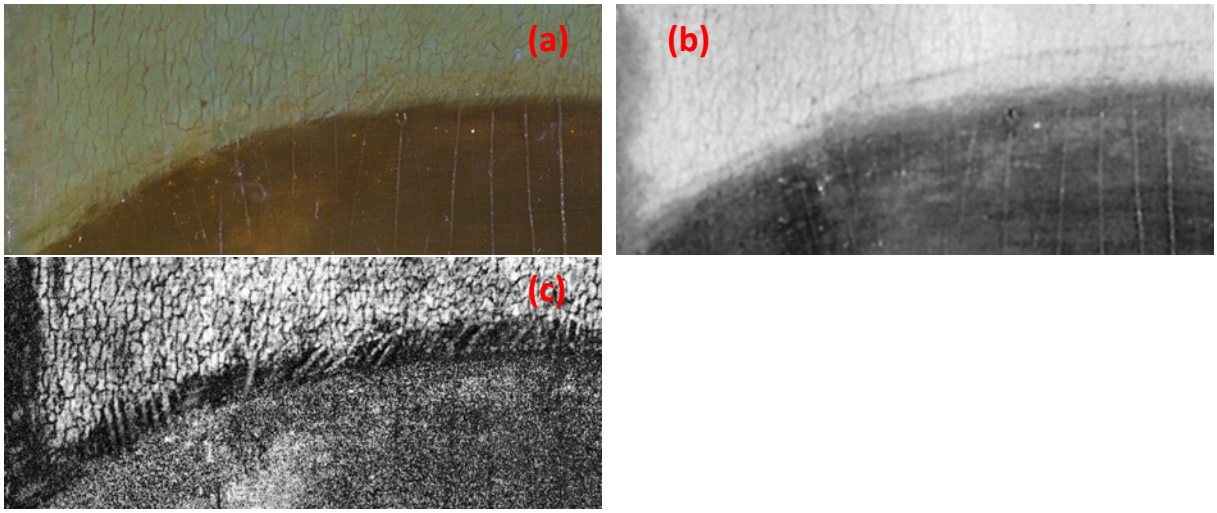



*Figure 138 - Partie supérieure droite de la tête de* La Joconde *: (a) image couleur ; (b) Infrarouge 1700 nm qui montre le dessin de l'ancien contour* © Louvre *; (c) Image L.A.M. qui montre les hachures situées sur le contour.* © P. Cotte

## 5.8 Autres repeints et repentirs

Les images L.A.M. ont révélé de nombreuses informations dissimulées dans la couche picturale, laissant supposer que la peinture ait traversé plusieurs phases. Ces découvertes ont été faites progressivement, fragment par fragment, puis organisées de manière logique afin de constituer un tout cohérent. Toutefois, et parce que cela dépasse le cadre de cette thèse, seules deux d'entre elles, potentiellement les plus significatives, seront mentionnées ici : un projet de coiffe abandonné et la robe originale de Lisa Gherardini.

### 5.8.1 Un projet de coiffe de Madone ?

Dans la partie droite du ciel de *La Joconde*, au-dessus de la tête, la méthode L.A.M. révèle un dessin distinct (voir Figure 139).

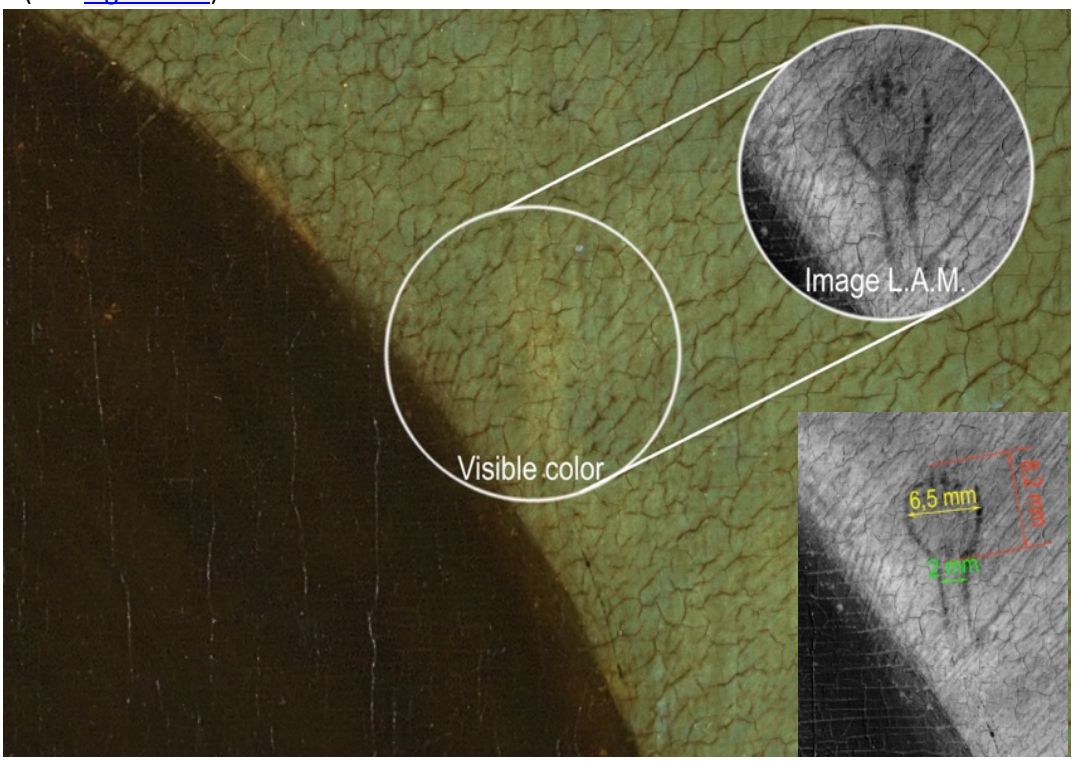



*Figure 139 - Détail du ciel de* La Joconde*, à droite de la tête.* © P. Cotte

Le trait est précis et bien défini. La forme, symétrique, se situe juste dans la zone des griffures précédemment étudiées (voir § 5.7.3, page 161). Comme déjà observé, l'imagerie traditionnelle en réflectographie infrarouge (Mohen, 2006; Frank, 2019) n'a pas permis de révéler ce détail (voir Figure 64, page 80).
D'après les historiens du costume (Gnignera, 2020), les dimensions et proportions observées (voir Figure 139) pour une échelle de 83% (6.5 = 7.8 mm ; 2 = 2.4 mm ; 8.2 = 9.8 mm) correspondent à un accessoire de coiffure, tel qu'une aiguille à cheveux (*agucchie da pomella*) (voir Figure 140) (Gnignera, 2016a), utilisé dans d'autres contextes, à différentes époques, dans différentes villes et pays. Cependant, cet accessoire semble inapproprié dans le cadre du portrait de *La Joconde*, dont le voile est incompatible avec une telle aiguille. Les strictes normes vestimentaires imposées par les lois somptuaires (Rainey, 1985; Killerby, 2002) en vigueur entre 1501 et 1507 pour les femmes de la noblesse et de la bourgeoisie florentines (Frick, 2005) précisent que les cheveux devaient être retenus dans un filet au début du XVI$^{e}$ siècle (Tinagli, 1997). Ainsi, il est peu probable que cette aiguille ait été

destinée à un portrait conventionnel, ce qui suggère qu'elle pourrait plutôt être associée à un projet de nature mystique, allégorique ou religieuse.

La caméra multispectrale révèle des détails cachés. Pour *La Joconde*, des analyses suggèrent que Léonard de Vinci avait envisagé une composition différente, l'œuvre ayant peut-être subi plusieurs révisions, comme le montrent les marques de grattage et le *spolvero*. Cette découverte est d'autant plus intrigante qu'elle laisse penser que Léonard, reconnu pour ses nombreuses références symboliques et allégoriques, avait peut-être initialement conçu des éléments plus complexes pour cette œuvre.

*Figure 140 - Épingles en alliage de cuivre (XV^e-XVI^e) composées d'une tige avec fil tiré et d'une tête sphérique de diamètre 4.1 mm ; tige 46.7 mm. Kent County Council (ID : KENT-EB4B07)*

Si cela est avéré, cela renforce l'idée que *La Joconde* n'a pas été conçue d'un seul tenant, mais a évolué au fil du temps avec des changements notables dans la symbolique et la composition, ce qui serait cohérent avec le mode de travail flexible de Léonard, comme en témoignent ses carnets.

Cette hypothèse laisse également envisager que *La Joconde* pourrait dissimuler d'autres traces de compositions ou de projets alternatifs. Si l'aiguille à cheveux appartenait à une figure allégorique ou religieuse, cela indiquerait que Léonard a radicalement modifié la direction de l'œuvre, passant d'une scène religieuse comme une *Madone à l'Enfant* à un portrait plus intime et énigmatique.

Un examen plus approfondi de l'ensemble de la partie céleste de *La Joconde* avec des images L.A.M. a révélé d'autres éléments non visibles, tous localisés autour de la tête, dans la zone délimitée par la Figure 141.

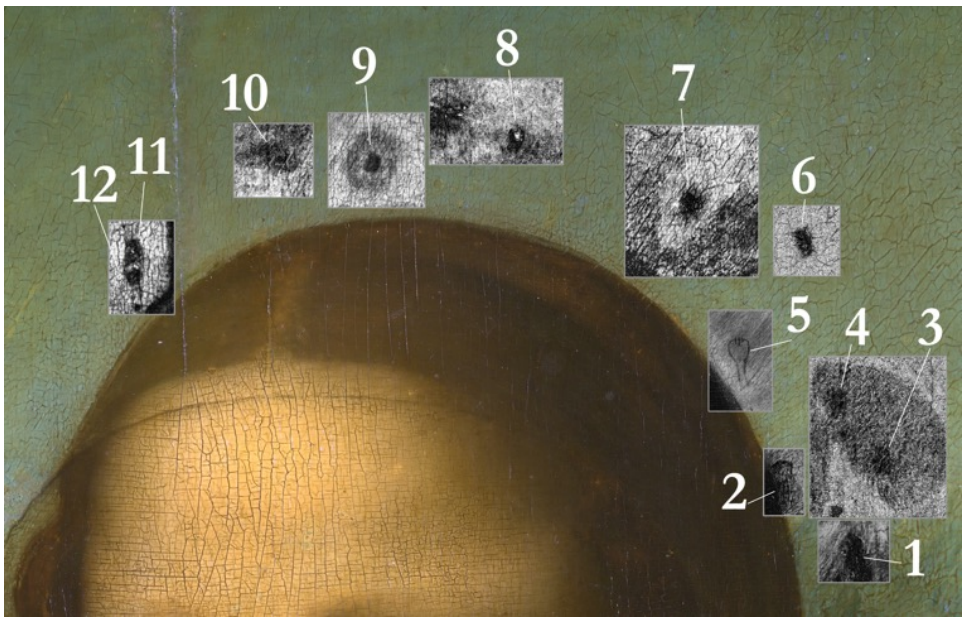



*Figure 141 - Détails retrouvés avec différentes images L.A.M. dans le ciel de* La Joconde. © P. Cotte

Ces éléments pourraient être interprétés comme de simples taches, bien qu'il soit peu probable d'en trouver autant dans une œuvre de Léonard de Vinci. Cependant, leur position limitée autour de la tête, leur fréquence, leur nombre, leur répartition quasi régulière, ainsi que leur taille bien proportionnée et similaire à l'aiguille à cheveux suggèrent une possible composition, un agencement structuré et

intentionnel. Certains de ces éléments sont entourés d'une zone délimitée sombre ou claire, qui structure l'hypothèse, donne du sens et de la cohérence d'ensemble.

L'analyse de leur environnement met en évidence des traits dessinés (voir Figure 142) formant des volutes aux contours réguliers et précis, qui encerclent parfois les éléments observés précédemment en les plaçant au cœur de ces motifs, renforçant ainsi l'hypothèse d'une composition intentionnelle et soigneusement élaborée. Toutefois, il est plausible que ces éléments soient restés à l'état de construction inachevée, ou peut-être même à celui plus rudimentaire de dessin préparatoire avec *imprimature*, sans avoir été complètement réalisés.

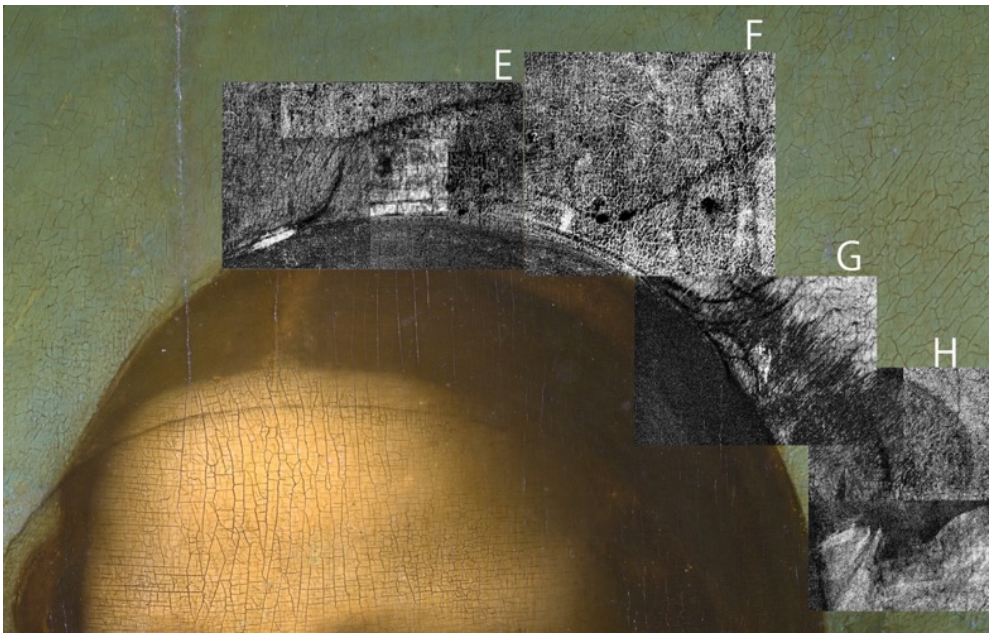



*Figure 142 - Mosaïque de différentes images L.A.M. autour de la tête de* La Joconde. © P. Cotte

La reconstitution complète de ce qui pourrait être une coiffe s'avère complexe en raison du grand nombre d'images L.A.M. révélant des détails variés à différentes profondeurs au sein de la couche picturale. Cette technique est extrêmement sensible aux paramètres des matériaux qui la composent, lesquels peuvent varier rapidement d'une zone à l'autre, rendant ainsi difficile l'obtention d'une vue d'ensemble cohérente et réaliste. À titre d'exemple, le calcul de dérivation numérique (voir § page 72) pour la zone G de la Figure 142, met en évidence l'aiguille à cheveux déjà identifiée et des arcs de cercle noirs dans la partie supérieure du détail images (voir LAM #1378 Figure 143), tandis que l'image #1446 prise au même endroit mais à une autre profondeur dans la couche picturale, révèle des volutes radicalement différentes, qui pourraient prolonger celles des zones adjacentes H et F de la Figure 142.

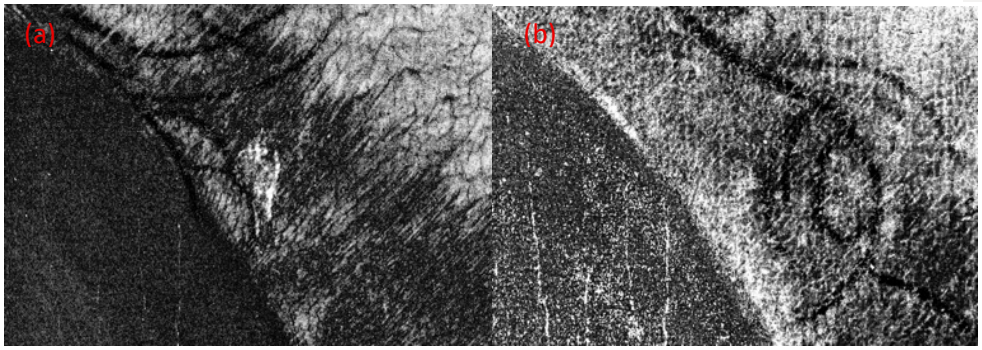



*Figure 143 - (a) LAM #1378 df 0-5-8 - (b) LAM #1446 df 1-8-9* © P. Cotte

Les représentations religieuses de la Renaissance italienne fournissent une abondance d'exemples qui permettent de mieux comprendre les conventions esthétiques de l'époque, en particulier en ce qui

concerne les coiffes des personnages religieux et allégoriques. Ces œuvres, souvent commanditées par l'Église ou des mécènes influents, reflètent des choix stylistiques précis qui visaient à illustrer la sacralité et la symbolique de figures spirituelles. Les coiffes portées par ces personnages varient en fonction de leur statut divin ou allégorique, allant de simples voiles pour les figures de la Vierge Marie à des ornements plus élaborés pour les saints, les anges ou les allégories de la vertu et de la sagesse. En plus des voiles, ces coiffes étaient souvent agrémentées d'ornementations précieuses telles que des perles, des aiguilles à cheveux et des pierreries, symboles de pureté et de noblesse spirituelle. Ces détails raffinés mettaient en valeur la beauté spirituelle des figures tout en affirmant leur rang dans la hiérarchie religieuse. Les exemples tirés des œuvres de grands maîtres comme Botticelli, Fra Filippo LIPPI, Raphaël ou Léonard de Vinci montrent clairement que la représentation des coiffes et de leurs ornements n'était pas un simple accessoire, mais bien une composante essentielle de la construction symbolique et iconographique des personnages. Ces coiffures, enrichies de perles et de gemmes, témoignent des normes culturelles et esthétiques de l'époque, tout en servant de marqueurs visuels pour comprendre l'intention artistique et religieuse derrière chaque tableau.

*Figure 144 - Étude pour la tête de la Sainte Anne (vers 1501), Léonard DE VINCI (1452- 1519) (←)*
*Sanguine, pierre noire et rehauts de blanc sur papier préparé beige - H. 24,4 ; L. 18,7 cm, Windsor, Royal Library 12 534.*

*Figure 145 - Cerchia di Raffaello de' Carli o Capponi, detto Raffaellino del Garbo. Tempera sur bois. XV^e. Coll. P. (centre)*

*Figure 146 - Madone avec l'enfant et deux Anges (1460-1465 ca) - détail, Fra Filippo LIPPI (1406-1469) (→)*
*Tempera sur bois - 95 x 62 cm, Galerie des Offices à Florence (Inv. 1890 : 1598).*

*Figure 147 - La Vierge à l'Enfant avec quatre Anges et les Saints (1487 ca) - détail, Alessandro FILIPEPI dit Sandro BOTTICELLI, retable du Palais de San Barnarba, tempera sur bois - 268 x 280 cm, Galerie des Offices (←)*

*Figure 148 - Madonna col Bambino (1466) - détail, Fra Filippo LIPPI (1406-1469), tempera sur bois - 155 x 71 cm, Palazzo Medici Riccardi à Florence (→)*

### 5.8.2 La robe Florentine de Lisa Gherardini

Il ne fait presque plus de doute que Léonard de Vinci a peint le portrait de Lisa Gherardini, dite *Monna Lisa*. En 1503, Agostino Vespucci, ami de Léonard de Vinci et membre de la Seigneurie de Florence, coadjuteur à la Chancellerie, note en marge d'un livre de Cicéron retrouvé à Heidelberg (Allemagne) par le Dr. Armin Schlechter[21]. Vespucci écrit que Léonard avait trois peintures en cours cette année-là, dont un portrait de *Monna Lisa del Giocondo*.

**Disparition de la robe Florentine**

L'historien Daniel Arasse faisait remarquer que « *s'il était vivant quand le tableau fut fini, Francesco del Giocondo se serait senti outragé et l'aurait probablement refusé* » (Arasse, 1992). Le terme *outragé* est fort, mais pertinent, car tout ce que Francesco aurait pu attendre de ce portrait, conformément aux conventions de l'époque, a désormais disparu.

Le portrait de Lisa Gherardini, peint par Léonard de Vinci en 1503, répondait au genre du portrait formel, avec un visage tourné vers la droite. Fier de la jeunesse et de la beauté de son épouse, et bien que l'on ne dispose d'aucune preuve formelle, Francesco aurait commandé cette œuvre pour immortaliser Lisa, non seulement en tant que compagne aimée, mais aussi en tant que symbole de son statut social et de sa réussite. Le tableau avait ainsi pour fonction de représenter Lisa Gherardini, incarnant les valeurs de chasteté et de fidélité, essentielles au sein de la bourgeoisie florentine.

Le portrait, reflétait à l'époque l'élégance de la mode florentine (Herald, 1981; Brown, 2001) et les aspirations sociales de son mari, un riche bourgeois. Lisa arborait alors une robe florentine, sobre mais luxueuse, conforme aux lois somptuaires en vigueur qui régissaient les tenues des femmes de la bourgeoisie (Rainey, 1985; Killerby, 2002; Dijk, 2015; Gnignera, 2016b) comme ce magnifique *Portrait de Maddalena Doni Strozzi* peint par Raphaël à la même époque (voir Figure 149). Cette robe (*gamurra)*, sans bijoux ostentatoires, ainsi que sa coiffure soignée, les cheveux tenus dans un filet (*reticella)*, situent la scène dans le contexte florentin du début du XVI[e] siècle, témoignant des goûts et des normes locales.

*Figure 149* - Portrait de Maddalena Doni Strozzi *(1506), Santi RAFFAELLO dit RAPHAËL, huile sur bois - 63 cm × 45 cm* © Palazzo Pitti

Aujourd'hui, les éléments vestimentaires florentins sont masqués derrière un voile de mystère. Les cheveux de Lisa, désormais détachés et longs, ne respectent plus les lois somptuaires de l'époque. Le portrait a ainsi perdu sa temporalité : on n'est plus en 1503, et on n'est plus à Florence. Ce n'est plus un portrait conventionnel, ayant perdu ses références temporelles et sociales. Le tableau ne représente plus la bourgeoisie florentine et ne reflète plus la richesse et le statut du commanditaire. Ce qui était autrefois une œuvre symbole d'un statut social est devenu une énigme intemporelle, effaçant les signes distinctifs de son époque et de sa fonction originale.

**Retrouver la robe florentine**

[21] Publié dans le catalogue des incunables de la librairie en mai 2005. HEIDELBERG, University Library, D 7620 qt. INC. : Cicero, Epistolae ad familiares, Bologna 1477, Bl. 11a.

Grâce aux images L.A.M., on retrouve la robe florentine cachée sous le voile qui la recouvre. Elles révèlent les éléments vestimentaires caractéristiques (voir Figure 151): les *nastri* (rubans décoratifs) reliant les manches amovibles aux couleurs de la maison familiale à la *gamurra* (robe ajustée), les *finestrelle* (manches ajourées) dévoilant la chemise blanche (Gnignera, 2016c), *l'acciaioli da spalla* (voile couvrant les épaules), et la *reticella sottile* (filet fin) enfermant soigneusement les cheveux. Le style de coiffure typique à Florence en 1503, comprenait souvent un filet très fin, qui contenait les cheveux. Ces coiffures, dans certains cas, pouvaient être appelées *Foggia alla francese* (Gnignera, 2010), complète cette tenue, respectant fidèlement les codes vestimentaires de l'époque.

Ces mêmes vêtements, accessoires, coiffures et règles vestimentaires se retrouvent dans tous les portraits de femmes florentines avant 1508 (voir Figure 149), témoignant de la rigueur des normes vestimentaires imposées par les lois somptuaires. Il était donc impossible que Léonard de Vinci ne se conforme pas à ces règles dans son portrait de Lisa Gherardini, car elles reflétaient non seulement l'identité de son modèle, mais aussi les valeurs sociales et esthétiques de la Florence du début du XVI$^{e}$ siècle.

Grâce à l'analyse par fragments de plusieurs dizaines d'images L.A.M., la robe florentine a pu être reconstituée dans son intégralité, intégrant tous ses attributs. Une simulation du portrait de Lisa Gherardini a été réalisée, de la même manière qu'un anthropologue pourrait recréer un visage à partir d'un crâne.

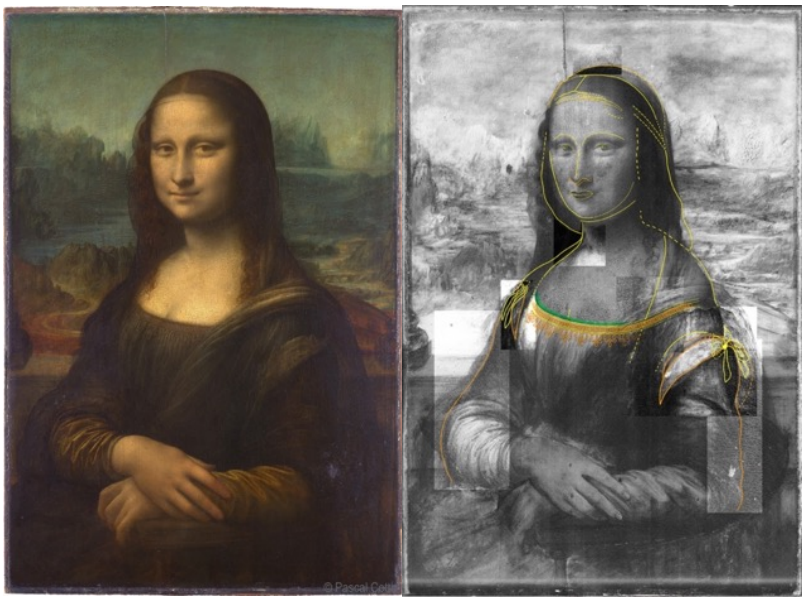


*Figure 150 - La Joconde aujourd'hui au musée du Louvre (←)*
*Figure 151 - Synthèse des contours du portrait original retrouvés avec les mosaïques d'images L.A.M (→)* © P. Cotte

**A propos de la simulation.**

La reconstitution en Figure 152 illustre la synthèse de cette étude, montrant comment les images L.A.M. enrichissent l'analyse des œuvres. Elle reste une hypothèse, destinée à explorer les possibilités qu'offrent ces images pour tester différentes interprétations. Pour les lecteurs intéressés, toutes les images L.A.M. sont disponibles dans l'ouvrage *Lumière on the Mona Lisa, Hidden portraits* (2015).

La reconstitution de la robe florentine apporte un nouvel éclairage sur l'évolution de l'œuvre, basée sur des données concrètes et rigoureuses. Sans prétendre offrir une vérité absolue, elle enrichit notre compréhension globale de l'œuvre.

Chaque fragment d'image a été soigneusement analysé, comparé et assemblé, dans une démarche scientifique rigoureuse, comme dans les reconstitutions en art ou en anthropologie. Cette approche,

courante dans les études d'art, vise à approfondir notre compréhension des étapes de création de l'œuvre et ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

*Figure 152* - La Joconde*, simulation du portrait original (←)* *© 2015 P. Cotte* *; cartographies du cuivre (centre) ; cartographie du mercure (→)* *© 2019 Laboratoire des musées de France*

Pour un chercheur, l'enthousiasme d'une découverte est souvent suivi du besoin de validation indépendante. La confirmation par d'autres chercheurs, avec des méthodes différentes, est essentielle pour établir sa crédibilité et son importance, marquant alors un tournant majeur.

En 2019, soit quatre ans après la publication des premières découvertes réalisées en 2015 grâce aux images L.A.M., le laboratoire des Musées de France a confirmé certains éléments de la robe originale de Lisa Gherardini en utilisant une méthode de cartographie d'éléments chimiques (Eveno et al., 2019). Cette technique détecte la présence de cuivre et de mercure, entre autres. Ces cartographies (voir Figure 152) ont révélé des détails vestimentaires également mis en évidence par les images L.A.M., corroborant plusieurs des découvertes précédentes, et constituant une première validation externe significative. Il est à noter que l'article n'a pas cité les travaux antérieurs.

Il faudra encore faire preuve de patience pour que d'autres détails importants, tels que les *nastri, l'acciaioli da spalla,* ou *la reticella sottile,* soient confirmés. Néanmoins, cette première confirmation représente une avancée majeure dans la reconnaissance de la validité des découvertes issues des images L.A.M. et ouvre la voie à de futures recherches qui viendront compléter et affiner ces résultats.

## Conclusion

Cette thèse a présenté la numérisation multispectrale de *La Joconde*, réalisée avec la caméra innovante développée pour ce travail. Effectuée en très haute résolution, elle a livré une quantité de données inédite à la fois sur l'ensemble du tableau et sur des détails comme le visage. La méthodologie adoptée, combinant réglages précis, contrôle environnemental et éclairage calibré, a garanti la sécurité de l'œuvre et la qualité scientifique des acquisitions, tandis que le calibrage et la normalisation ont assuré une restitution fidèle des caractéristiques matérielles et visuelles.

Les analyses scientifiques des données collectées ont révélé des informations essentielles, non seulement sur l'état de conservation de *La Joconde*, mais aussi sur les matériaux et techniques utilisés par Léonard de Vinci. Le dévernissage virtuel, en simulant le retrait numérique du vernis ancien, a restitué des couleurs proches de l'intention originale de l'artiste, tout en mettant en évidence l'impact du temps sur l'aspect visuel de l'œuvre. Cette approche a également facilité l'identification des pigments et des mélanges utilisés, renforçant ainsi notre compréhension des choix techniques et esthétiques de Léonard. Par ailleurs, les images multispectrales et les analyses spectrales ont permis de visualiser des couches picturales invisibles à l'œil nu, révélant des restaurations anciennes, des repentirs et des ajustements réalisés par l'artiste, témoins de son processus créatif complexe et évolutif.

Cette étude, enrichie par l'imagerie L.A.M., a révélé des éléments jusqu'alors inconnus concernant la technique exécutive de Léonard de Vinci dans la réalisation de *La Joconde*. Ces découvertes apportent un éclairage nouveau sur certaines étapes clés du processus créatif de Léonard, tout en complétant les connaissances déjà bien établies.

Léonard utilise une planche de peuplier comme support, réduite aujourd'hui à environ 14 mm d'épaisseur. Cette étape est bien documentée, ainsi que le fait qu'il peint sur la face la plus éloignée du cœur de l'arbre. Pour stabiliser la planche, celle-ci est placée dans un cadre de contention. La préparation de la surface débute probablement par l'application d'un *gesso-colle*, bien que cette étape ne soit pas encore confirmée. La surface est ensuite recouverte de blanc de plomb, tandis que l'autre face est protégée par une couche de colle de peau afin de prévenir les déformations ultérieures.

Les découvertes majeures commencent avec la première étape de la technique exécutive : le *spolvero*. Révélée par l'imagerie L.A.M. (chapitre 1), cette méthode consistait à percer de petits trous le long du dessin préparatoire puis à appliquer du noir de fumée, créant une série de points noirs servant de guide pour reporter le motif sur la planche. Léonard affinait ensuite la composition par un dessin plus précis et abouti. Fait remarquable, il traça également des croix dans les yeux, destinées à fixer le placement du regard et probablement à servir de repères pour d'autres éléments de la composition.

Commence alors le travail des sous-couches, avec l'application d'un pigment brun en fines couches, connu sous le nom d'*imprimature*, afin de définir les formes, les ombres et les lumières de manière monochrome. Cette *imprimature*, particulièrement visible dans les zones d'ombre, « éteint » la lumière du fond, tandis que dans les zones plus claires, Léonard utilise des *imprimature* colorées, telles que le bleu d'azurite pour le ciel ou le jaune ocré pour les teintes chair, pour soutenir les couleurs finales.

Les couches suivantes, révélées par l'ETR, témoignent de l'usage des glacis. Ces fines couches translucides, superposées, permettent à Léonard d'obtenir des dégradés subtils et de créer l'effet de *sfumato* pour lequel il est si connu. En parallèle, lors de la phase préparatoire, il utilise ses doigts pour étaler la peinture et dans la phase finale, les empreintes se limitent à de légers mouvements pour créer des nuances subtiles, des dégradés presque imperceptibles. L'imagerie L.A.M. a ainsi révélé la présence de traces de doigt sur le cou et entre les mains.

Une autre découverte importante concerne l'utilisation du grattage (ou griffage). Dans certaines zones, Léonard a employé une pointe dure pour retirer de la matière picturale déjà sèche et durcie, effaçant ainsi un projet antérieur et modifiant la composition. Cette technique, invisible à l'œil nu mais révélée par les images L.A.M., atteste d'une intervention tardive et d'une volonté de révision profonde. Les images L.A.M. ont également révélé une autre pratique distincte : de petites hachures, appliquées localement pour corriger certains détails.

Enfin, il est probable qu'à l'issue de ces étapes, Léonard ait appliqué un vernis destiné à protéger la peinture et à renforcer la profondeur des couleurs. Cette hypothèse s'appuie sur les pratiques courantes de son époque.

Ainsi, cette étude a révélé, grâce à l'imagerie L.A.M., des découvertes inédites concernant l'emploi du *spolvero*, des glacis, du grattage, des hachures, et de l'usage des doigts, cinq techniques qui enrichissent considérablement notre compréhension du génie technique de Léonard et de la complexité de son processus créatif.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse, située au carrefour de l'art et de la science, démontre le potentiel de l'imagerie multispectrale comme outil d'analyse, de compréhension et de préservation des chefs-d'œuvre du patrimoine artistique mondial. Face aux limites historiques des méthodes d'investigation destructives et aux outils traditionnels, ce travail ouvre une nouvelle proposition pour l'étude scientifique non invasive des œuvres d'art, tout en respectant leur intégrité matérielle et esthétique.

L'innovation majeure mise en avant par cette recherche repose sur le développement d'une caméra multispectrale de 240 mégapixels, associée à un dispositif d'éclairage utilisant des projecteurs à réflecteurs ellipsoïdaux produisant une lumière collimatée et positionnés à l'angle de Brewster, ainsi qu'à la méthode L.A.M. de traitement d'images multispectrales. Cette combinaison technologique, capable de capturer des spectres de réflectance, de restituer avec plus de précision la saturation des couleurs, et de révéler les structures internes des peintures, complète les systèmes d'imagerie conventionnels. L'avancée technique et méthodologique proposée, constitue un véritable changement de paradigme dans l'étude des œuvres d'art. En repoussant les limites des technologies muséales existantes, elle permet désormais une lecture simultanée, visuelle, spectrale et matérielle des peintures.

Cette caméra multispectrale a permis de collaborer avec plusieurs grands musées de renom, tels que le Louvre, la National Gallery, le musée Royal des Beaux-Arts de Bruxelles ou le musée Van Gogh, aboutissant à la numérisation de plus de 1500 œuvres.

En explorant la possibilité d'intégrer la granulométrie et les distributions bimodales des grains de pigments dans l'étude des interactions de la lumière avec les couches picturales, cette recherche ouvre une piste prometteuse pour formuler des hypothèses de travail et de traitement. Bien que cette approche soit encore largement inexplorée dans le domaine des traitements d'images scientifiques, en raison de la complexité et de la multitude des paramètres nécessaires, elle pourrait constituer une base pour mieux appréhender les phénomènes optiques, tels que la diffusion, la réflexion et l'absorption de la lumière. Si elle reste théorique à ce stade, cette démarche pourrait néanmoins inspirer le développement de nouveaux algorithmes capables de tenir compte, dans une certaine mesure, de la taille des grains de pigment, pour des analyses plus performantes et ciblées.

L'application de ces outils à *La Joconde* a permis d'ouvrir un nouveau chapitre dans l'étude du chef-d'œuvre de Léonard de Vinci. Cette œuvre emblématique a bénéficié d'une numérisation multispectrale haute résolution, fournissant pour la première fois un spectre de réflexion diffus pour chaque pixel, comparable à un spectrophotomètre de surface. Les découvertes obtenues grâce à cette technologie sont d'importance, comme le dévernissage virtuel pour la reconstitution des couleurs d'origine. Mais aussi, cette thèse révèle avec précision les subtilités de la technique exécutive de l'artiste, confirmant l'importance des glacis du *spolvero* et du *sfumato*, caractéristiques emblématiques de son travail, et identifiant des techniques innovantes telles que le grattage des zones à corriger lorsque la peinture était devenue dure et sèche ou encore le recours à un système de hachures pour ombrer ou dégrader les transitions. Grâce aux données spectrales et aux images L.A.M., des détails jusqu'alors invisibles, comme des repentirs, des esquisses préparatoires et des ajustements subtils, ont été mis au jour, offrant un éclairage inédit sur le processus créatif évolutif de Léonard. La découverte d'un autre projet dissimulé dans les couches profondes de la peinture, et la découverte d'une robe aux caractéristiques typiquement florentines cachée sous le voile sombre, démontrent que le portrait a subi une transformation profonde. Ces découvertes témoignent de l'approche expérimentale et rigoureuse de l'artiste, ainsi que de sa quête perpétuelle de perfection.

**Perspectives**

La suite de cette recherche est le développement d'une nouvelle génération de caméra multispectrale.

Les améliorations proposées visent à renforcer les capacités de la caméra multispectrale, tout en préservant ses avantages fondamentaux. Cela signifie que la caméra doit être un dispositif monobloc, sans recourir à un déplacement sur un banc XY. Cette configuration garantit une installation flexible, particulièrement adaptée aux contraintes des musées et aux diverses configurations spatiales qu'ils peuvent présenter. De plus, l'éclairage associé à cette technologie doit être collimaté et permettre la polarisation de la lumière dont nous avons mesuré les avantages décisifs à l'angle de Brewster. Cette approche exclut l'utilisation de dispositifs d'éclairage à 45°, qui tendent à illuminer l'ensemble de l'œuvre de manière uniforme, afin de privilégier une analyse plus ciblée et précise des détails picturaux.

L'objectif est de dépasser les limites actuelles, en s'appuyant sur des avancées scientifiques et des collaborations interdisciplinaires, pour offrir des solutions adaptées aux exigences des professionnels du domaine.

Dans cette optique, plusieurs axes de développement se dessinent. La feuille de route s'articule autour de plusieurs axes d'amélioration. Il est envisagé d'augmenter la définition de l'image à 2 milliards de pixels (soit une résolution de 40 000 x 50 000 pixels), ce qui permettra d'analyser des œuvres de grande taille tout en conservant une résolution d'au moins 500 dpi, essentielle pour l'étude des craquelures. Cela nécessitera le développement d'une optique capable de couvrir un champ plus large dans le plan focal de la caméra, ainsi que l'intégration d'un capteur matriciel monté sur un micro-banc XY interne à la caméra. Cette configuration, grâce à la compacité du capteur et du banc, permet une meilleure intégration dans un dispositif réduit.

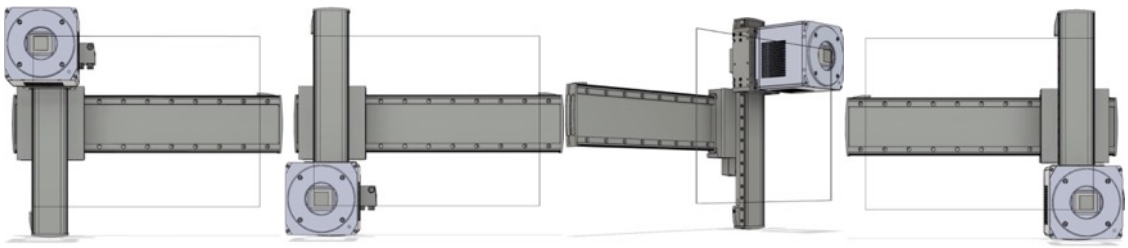


*Figure 153 - Les quatre positions extrêmes du capteur matriciel sur un banc XY pour reconstituer un plan focal plus large.*

En parallèle, la résolution spectrale sera améliorée et le nombre de filtres augmentés pour offrir une analyse plus fine des matériaux. L'élargissement du spectre d'analyse sera également une priorité, avec l'application de traitements anti-reflet à l'optique, permettant d'étendre la plage de détection vers les longueurs d'onde proches des UV et des infrarouges. Un capteur à sensibilité étendue, couvrant une gamme de 350 à 1200 nm, sera intégré pour améliorer cette capacité d'analyse.

Enfin, l'introduction de la fluorescence UV et de la technique V.I.L. (*Visible-Induced Luminescence*) viendra compléter l'ensemble des outils disponibles, en permettant de détecter la fluorescence des UV dans les infrarouges. Ces améliorations permettront d'enrichir l'analyse des œuvres d'art et de pousser encore plus loin les capacités de détection des matériaux et des altérations invisibles à l'œil nu.

Un autre axe de développement repose sur l'augmentation de la dynamique de la caméra. En adoptant des capteurs avancés, comme les EMCCD ou sCMOS, et en intégrant des technologies à expositions multiples de type HDR, il serait possible d'améliorer la qualité des mesures et leur dynamique tout en conservant une haute précision. L'éclairage, quant à lui, pourrait bénéficier de la technologie des

lampes à spectre large, telles que le modèle Sirius 450W d'Osram, associée à un système de collimation optique avancé par miroir.

Au-delà des aspects purement matériels, le développement de logiciels et de méthodes constitue un pilier essentiel pour l'évolution de cette technologie. L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique permettrait d'optimiser le traitement des données spectrales, de reconnaître des motifs spécifiques et d'anticiper des altérations potentielles. Ces outils numériques, en collaboration avec des experts en conservation et des historiens de l'art, pourraient transformer la manière dont les œuvres sont analysées et documentées.

Enfin, ces innovations ne seraient complètes sans une normalisation des méthodes d'analyse, afin d'assurer une comparabilité des résultats entre institutions, et sans un effort éducatif pour former les utilisateurs à ces nouvelles techniques. Ces améliorations ne se limiteraient pas à l'analyse des œuvres, mais incluraient également des applications pratiques pour leur conservation, leur authentification et leur valorisation en s'appuyant sur le protocole d'analyse et d'authentification des œuvres publié par le ***Laboratorio Diagnostico del Dipartinento di Beni Culturali dell'Universita di Bologna*****, la référence en la matière**. https://site.unibo.it/laboratorio-diagnostico-dbc/it/best-practice-a-supporto-dell-autenticazione-di-dipinti

En définitive, les perspectives d'amélioration de la caméra multispectrale incarnent une approche ambitieuse et visionnaire pour explorer, préserver et valoriser le patrimoine culturel. Elles témoignent de l'importance d'une technologie adaptable et évolutive, capable de répondre aux défis d'un domaine en constante mutation

**Applications et implications présentes et futures**

Au-delà de l'étude de *La Joconde*, cette thèse propose une méthodologie généralisable pour l'analyse d'autres œuvres patrimoniales. L'approche interdisciplinaire adoptée, qui allie optique, spectrométrie, physique des matériaux et histoire de l'art, ouvre des perspectives nouvelles pour la conservation et la restauration. La capacité à analyser les couches picturales sans prélèvement, à modéliser les interactions complexes entre la lumière et les matériaux, et à identifier les pigments avec une précision spectrale accrue, en fait un outil idéal pour les musées, les conservateurs et les chercheurs.

Loin d'être une finalité, cette thèse constitue un point de départ pour des recherches futures qui promettent d'élargir encore davantage le champ d'application de l'imagerie multispectrale dans l'étude et la préservation des œuvres d'art. Les avancées présentées ouvrent des perspectives inédites pour de nouveaux domaines d'investigation, aussi bien dans l'art que dans d'autres secteurs connexes.

L'une des premières perspectives concerne l'application systématique de cette technologie à d'autres sortes d'œuvres comme les fresques, les peintures murales, les manuscrits enluminés ou les palimpsestes, peuvent aussi bénéficier de cette technologie.

Le succès du déchiffrage du palimpseste de la Bibliothèque Ambrosienne de Milan grâce à la méthode L.A.M., sur un texte de Ptolémée à propos des cadrans solaires est un brillant exemple d'application diversifiée de cette recherche (Gysembergh et al., 2023).

De plus, la caméra peut également être utilisée pour répondre à des besoins spécifiques des utilisateurs. Par exemple, un programme de recherche à l'Université de Bologne explore déjà l'utilisation de cette technologie pour la détection des glacis dans les peintures, tandis qu'une initiative à l'Université de Lausanne examine la distinction entre les traces de pinceau et les empreintes digitales.

Ces projets illustrent le potentiel de la caméra à répondre à diverses exigences et à repousser les frontières de l'analyse artistique.

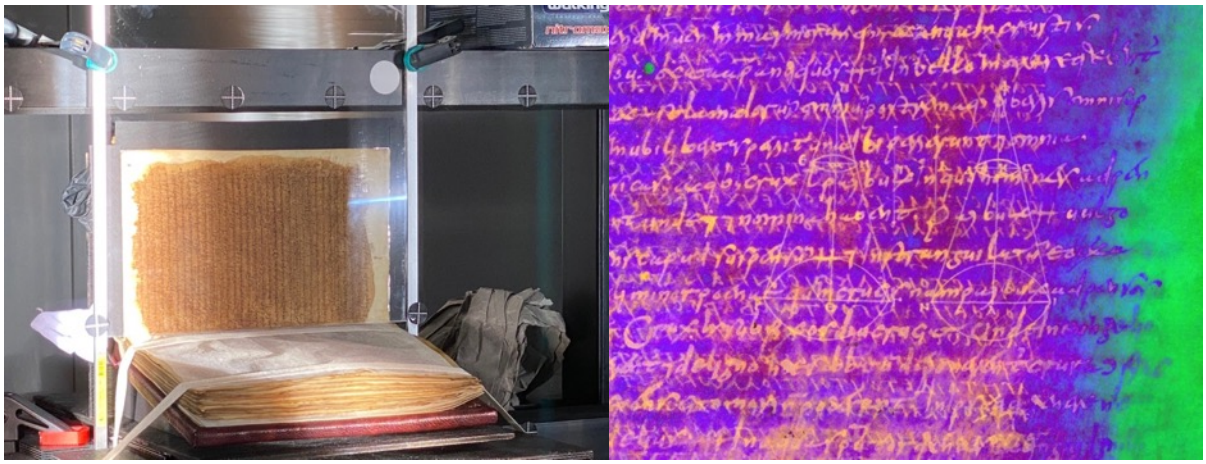


*Figure 154 - Numérisation multispectrale du palimpseste L99 sup, Bibliothèque Ambrosienne, Milan. - Image après traitements montrant le texte original de Ptolémée et ses premières illustrations.*

**Ouverture transdisciplinaire de la méthode L.A.M.**

Au-delà du champ patrimonial, la méthode L.A.M. révèle un potentiel d'application dans de nombreux domaines où l'on cherche à extraire des signaux faibles masqués par des composantes dominantes. Développée à partir de données multispectrales, elle peut être transposée à d'autres modalités de détection. En acoustique, elle pourrait servir à isoler des sons faibles noyés dans un environnement bruyant à partir de deux microphones. Dans le domaine médical, des perspectives existent pour l'échographie ou la détection optique du pouls par imagerie rouge/infrarouge. Les signaux radar, ainsi que l'imagerie par rayons X à énergies différenciées, offrent également des contextes propices à son utilisation. Ces exemples soulignent que la méthode L.A.M., née de l'étude d'une œuvre d'art emblématique, ouvre en réalité une voie méthodologique plus large : celle d'un traitement différentiel de signaux applicable à toute discipline confrontée à la difficulté de révéler l'invisible derrière le visible.

Dans un contexte où la conservation préventive est devenue une priorité pour les institutions patrimoniales, l'imagerie multispectrale permet d'évaluer l'état de dégradation des œuvres avec une finesse inégalée, en identifiant, par exemple, des fissures, des soulèvements de matière ou des altérations chimiques invisibles à l'œil nu. À l'avenir, cette technologie pourrait être associée à des modèles prédictifs pour anticiper l'évolution des dégradations et permettre des interventions ciblées, minimisant ainsi les risques pour l'œuvre.

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et des algorithmes d'apprentissage automatique ouvre des perspectives prometteuses dans l'analyse et la préservation des œuvres d'art. En automatisant le traitement de grandes quantités de données spectrales et d'images multispectrales, l'IA facilite l'identification des matériaux, des pigments et des zones d'intérêt, tout en permettant la détection d'altérations subtiles, la cartographie des craquelures et l'analyse des signatures optiques des matériaux historiques. Grâce à des réseaux neuronaux spécialisés et des bases de données centralisées enrichies, l'IA optimise la comparaison des données recueillies avec des références historiques et scientifiques, offrant ainsi des outils d'aide à la décision pour les restaurateurs. Ces avancées permettront non seulement de reconstruire les techniques artistiques anciennes et d'attribuer les œuvres, mais aussi d'anticiper les dégradations grâce à des modèles prédictifs, contribuant ainsi à une conservation préventive plus efficace.

En parallèle, la lutte contre les faussaires et les contrefaçons constitue un autre champ d'application prometteur. Si les techniques actuelles permettent déjà de détecter les faux avec une grande fiabilité, elles restent longues et coûteuses. Cet outil associé à l'intelligence artificielle (IA) offre une alternative en automatisant l'identification des faux, non plus uniquement basée sur les images, mais sur les données intrinsèques de la matière picturale et de la technique de l'artiste. Cette approche réduit les incertitudes liées à la qualité des images en ligne et aux éventuelles falsifications des bases de données avec l'introduction de tableaux faussement attribués. En se concentrant sur des caractéristiques physiques et chimiques uniques, cette technologie garantit des résultats plus robustes et fiables.

De plus, cette technologie, en permettant de créer une carte d'identité unique pour chaque œuvre, pourrait en garantir la traçabilité grâce à une association précise et univoque entre l'œuvre et les données collectées. Une approche exemplaire pourrait être l'association biométrique au support matériel, qui repose sur l'identification et l'enregistrement des caractéristiques physiques, chimiques et structurelles propres et uniques à l'œuvre. La trame spécifique de la toile, les empreintes des coups de pinceau et les spectres de réflectance relevés au niveau de chaque pixel constituent des "signatures biométriques" intrinsèques et infaillibles. Ces données, vérifiables scientifiquement, permettent d'identifier chaque œuvre de manière incontestable, offrant une solution innovante pour son authentification, sa protection et sa valorisation dans une perspective durable et technologiquement avancée.

En effet, les avancées technologiques présentées dans cette thèse s'inscrivent parfaitement dans le cadre du *European Collaborative Cloud for Cultural Heritage* (ECCCH), une initiative majeure de l'Union européenne visant à créer une infrastructure numérique collaborative dédiée à la recherche, à la conservation et à la valorisation du patrimoine culturel. La caméra multispectrale de haute résolution et la méthode L.A.M. pourront contribuer de manière significative à cette plateforme, en proposant des solutions innovantes pour la numérisation, l'analyse scientifique et la documentation des œuvres d'art. En convergence avec les résultats de cette thèse, l'ECCCH offre des avantages concrets, notamment la centralisation des données et des connaissances grâce à l'intégration d'images multispectrales et de données spectrales dans une plateforme unique facilitant le partage et la collaboration scientifique entre experts. Elle optimise également les ressources en réduisant les coûts des investigations scientifiques et en rendant les technologies avancées accessibles aux institutions plus modestes. De plus, la standardisation des méthodologies pour la collecte et l'analyse des données garantit des résultats plus cohérents et comparables à l'échelle internationale, tandis que le développement de nouveaux outils collaboratifs, incluant l'intelligence artificielle et des modèles prédictifs, accélère l'analyse des données et soutient en temps réel les restaurateurs, conservateurs et historiens de l'art dans leurs prises de décision. Enfin, cette plateforme élargit l'accessibilité au patrimoine culturel en proposant des outils interactifs et des contenus numérisés de haute qualité, renforçant ainsi la diffusion des connaissances auprès d'un public plus large.

Ces efforts technologiques, bien qu'innovants, ne représentent qu'une partie des avancées en cours dans le domaine de l'imagerie scientifique dédiée aux œuvres d'art. D'autres dispositifs émergents, comme l'imagerie térahertz (Valušis et al., 2021), la *pulse-compression Infrared thermography* (PCIRT) (Laureti et al., 2019; Ricci et al., 2021), l'imagerie hyperspectrale (Gao et al., 2023; Vasco et al., 2024) et la cartographie par fluorescence X (MA-XRF mapping) (Freitas et al., 2024; Preisler et al., 2024; Verinaz-Jadan et al., 2024), enrichissent également l'arsenal des techniques disponibles pour les laboratoires de musées et les centres de recherche.

Les recherches récentes mettent en lumière des approches complémentaires. Par exemple, l'imagerie térahertz permet de sonder les couches internes des œuvres avec une précision supérieure, ouvrant des possibilités pour analyser des structures cachées ou détecter des restaurations anciennes. La PCIRT

exploite des impulsions thermiques compressées pour cartographier, avec une sensibilité accrue, des anomalies invisibles à l'œil nu, comme des fissures ou des zones d'altération. L'imagerie hyperspectrale, quant à elle, étend le spectre analysé pour identifier plus finement les pigments et matériaux grâce à une résolution spectrale accrue. Enfin, le MA-XRF fournit une cartographie élémentaire des surfaces, permettant d'identifier et de localiser précisément les éléments chimiques présents dans les pigments ou les traces d'altérations. Des travaux récents démontrent l'efficacité de cette méthode pour révéler des détails de composition chimique complexes et contribuer à l'authentification ou à la restauration des œuvres d'art.

Ces développements, illustrés par ces travaux récents (2019-2024) cités précédemment, témoignent de l'effervescence scientifique dans le domaine et de l'importance d'une complémentarité entre ces outils. En synergie avec les innovations technologiques présentées dans cette thèse, ils offrent une opportunité unique de renforcer l'impact des analyses scientifiques appliquées aux œuvres d'art. En combinant des approches visuelles, spectrales, thermiques et chimiques, il serait possible d'établir une méthodologie interdisciplinaire encore plus robuste, répondant de manière optimale aux exigences des institutions muséales et des chercheurs.

L'interconnexion entre les technologies développées dans cette thèse et l'ECCCH démontre le potentiel d'une recherche interdisciplinaire et collaborative à l'échelle européenne, apportant des réponses concrètes aux défis contemporains de la conservation et de la valorisation du patrimoine culturel.

En conclusion, cette thèse ne se limite pas à une étude de cas emblématique sur *La Joconde*. Elle propose des outils innovants et des méthodologies rigoureuses qui, couplés à des infrastructures collaboratives comme l'ECCCH, ouvrent la voie à une révolution numérique dans la recherche sur le patrimoine culturel. L'intégration des avancées en imagerie multispectrale, combinées à l'intelligence artificielle et à la mutualisation des données, permettra non seulement de préserver les chefs-d'œuvre pour les générations futures, mais aussi d'en révéler des aspects inédits encore insoupçonnés.

# BIBLIOGRAPHIE


Abrardo, A. *et al.* (1996) « Art-works colour calibration by using the VASARI scanner », in *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, p. 94-96. Disponible sur: https://library.imaging.org/admin/apis/public/api/ist/website/downloadArticle/cic/4/1/art00026 (Consulté le: 19 mai 2024).

Adams, J.B. *et al.* (1995) « Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon », *Remote Sensing of Environment*, 52(2), p. 137-154. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00098-8.

Alarcon, M.R. *et al.* (2023) « Scientific CMOS sensors in Astronomy: IMX455 and IMX411 », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135(1047), p. 055001. Disponible sur: https://doi.org/10.1088/1538-3873/acd04a.

Ambrosini, D. *et al.* (2010) « Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics », *Journal of Cultural Heritage*, 11(2), p. 196-204. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.05.001.

Amiri, M.M., Messinger, D.W. et Hanneken, T.R. (2024) « Colorimetric characterization of multispectral imaging systems for visualization of historical artifacts », *Journal of Cultural Heritage*, 68, p. 136-148. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.05.014.

Arasse, D. (1992) *Le Détail: Pour une histoire rapprochée de la peinture*. Paris: FLAMMARION.

Arasse, D. (2003a) « La Joconde », in *Léonard de Vinci: Le rythme du monde*. Paris: Hazan, p. 386-394.

Arasse, D. (2003b) *Léonard de Vinci: Le rythme du monde*. Paris: Hazan.

Arsene, C. *et al.* (2017) « Computational Techniques in Multispectral Image Processing: Application to the Syriac Galen Palimpsest ». arXiv. Disponible sur: https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.02508.

Bacci, M. *et al.* (2005) « A study on a set of drawings by Parmigianino: integration of art-historical analysis with imaging spectroscopy », *Journal of Cultural Heritage*, 6(4), p. 329-336. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.07.002.

Balas, C. *et al.* (2018) « Hyperspectral imaging and spectral classification for pigment identification and mapping in paintings by El Greco and his workshop », *Multimedia Tools and Applications*, 77(8), p. 9737-9751. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/s11042-017-5564-2.

Bardoux, A. et Quicot, J.-J. (2017) « Linear CCD array TH-7834B performances near 10 MHz », in *International Conference on Space Optics — ICSO 2004*. *International Conference on Space Optics — ICSO 2004*, SPIE, p. 473-475. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.2308031.

Baronti, S. *et al.* (1998) « Multispectral Imaging System for the Mapping of Pigments in Works of Art by use of Principal-Component Analysis », *Applied Optics*, 37(8), p. 1299-1309. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/ao.37.001299.

Bellucci, R. *et al.* (2007) « Integration of image data from 2D and 3D optical techniques for painting conservation applications », *The Imaging Science Journal*, 55(2), p. 80-89. Disponible sur: https://doi.org/10.1179/174313107X145209.

Berns, R. et de la Rie, R. (2003) « The Effect of the Refractive Index of a Varnish on the Appearance of Oil Paintings », *Studies in Conservation*, 48, p. 251-262. Disponible sur: https://doi.org/10.1179/sic.2003.48.4.251.

Bette, S. *et al.* (2017) « On verdigris, part I: synthesis, crystal structure solution and characterisation of the 1–2–0 phase (Cu 3 (CH 3 COO) 2 (OH) 4 ) », *Dalton Transactions*, 46(43), p. 14847-14858. Disponible sur: https://doi.org/10.1039/C7DT03288A.

Bianco, G., Bruno, F. et Muzzupappa, M. (2013) « Multispectral data cube acquisition of aligned images for document analysis by means of a filter-wheel camera provided with focus control », *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), p. 190-200. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.07.002.

Blais, F. *et al.* (2007) « More than a poplar plank: the shape and subtle colors of the masterpiece Mona Lisa by Leonardo », in *Videometrics IX*. *Videometrics IX*, SPIE, p. 43-52. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.705411.

Bohn, S., Pauchard, L. et Couder, Y. (2005) « Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. », *Physical Review E*, 71(4), p. 046214. Disponible sur: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.046214.

Bonanno, A. *et al.* (2017) « La riflettografia infrarossa tra fisica, arte e tecnologia », *Il Giornale di Fisica*, LVIII. Disponible sur: https://doi.org/10.1393/gdf/i2017-10260-5.

Bonifazzi, C. *et al.* (2006) « A scanning device for multispectral imaging of paintings », in *Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science*. SPIE, p. 190-199.

Bonizzoni, L. *et al.* (2012) « round and after leonardo: the painting technique of a 'virgin of the rocks' attributed to Bernardino Luini », in. *VII Congresso Nazionale di Archeometria AIAr*, MOdena: AIAr.

Bonizzoni, L. *et al.* (2017) « Looking for Common Fingerprints in Leonardo's Pupils Using Nondestructive Pigment Characterization », *Applied Spectroscopy*, 71(8), p. 1915-1926. Disponible sur: https://doi.org/10.1177/0003702817694901.

Broecke, L. (2015) *Cennino Cennini's Il Libro Dell'arte: A New English Translation and Commentary with Italian Transcription*. Bilingual édition. London: Archetype Publications Ltd.

Brown, D.A. (2001) *Virtue & Beauty: Leonardo's Ginevra de' Benci and Renaissance Portraits of Women*. Washington: Natl Gallery of Art.

Brown, M. et Lowe, D.G. (2007) « Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features », *International Journal of Computer Vision*, 74(1), p. 59-73. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/s11263-006-0002-3.

Bucklow, S. (1997) « The description of craquelure patterns », *Studies in Conservation*, 42(3), p. 129-140. Disponible sur: https://doi.org/10.1179/sic.1997.42.3.129.

Bucklow, S. (1999) « The Description and Classification of Craquelure », *Studies in Conservation*, 44(4), p. 233-244. Disponible sur: https://doi.org/10.2307/1506653.

Bull, D. (1992) « Two Portraits by Leonardo: "Ginevra de' Benci" and the "Lady with an Ermine" », *Artibus et Historiae*, 13(25), p. 67. Disponible sur: https://doi.org/10.2307/1483457.

Burns, P. (1997) « Analysis of image noise in multispectral color acquisition », in. Disponible sur: https://www.semanticscholar.org/paper/ANALYSIS-OF-IMAGE-NOISE-IN-MULTISPECTRAL-COLOR-Burns/61c8fb0e14dc116efa662a2dd6dde594c8c1799b (Consulté le: 20 mai 2024).

Burns, P. et Berns, R. (1998) « Image Noise and Colorimetric Precision in Multispectral Image Capture », *Final Program and Proceedings - IS and T/SID Color Imaging Conference*, 6. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.1998.6.1.art00018.

Camps-Valls, G. *et al.* (2006) « Composite kernels for hyperspectral image classification », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), p. 93-97. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.857031.

Candès, E.J. *et al.* (2011) « Robust principal component analysis? », *J. ACM*, 58(3), p. 11:1-11:37. Disponible sur: https://doi.org/10.1145/1970392.1970395.

Cappellini, V. *et al.* (2005) « An automatic registration algorithm for cultural heritage images », in *IEEE International Conference on Image Processing 2005*. *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, p. II-566. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/ICIP.2005.1530118.

de Carvalho Júnior, O. et Meneses, P. (2000) « Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM) ».

Casoli, A., Darecchio, M.E. et Sarritzu, L. (2009) *I coloranti nell'arte*. Il Prato.

Castro, Y. *et al.* (2022) « Extended Framework for Multispectral RTI », *Archiving Conference*, 19, p. 56-61. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/issn.2168-3204.2022.19.1.12.

Cennini, C. d'Andrea (2012) *Il Libro dell'Arte, Trattato della Pittura, 1437*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Chandrasekhar, S. (1960) *Radiative Transfer*. Dover Publications.

Chen, P. et Trussell, H.J. (1995) « Color filter design for multiple illuminants and detectors », in *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, p. 67-70.

Chen, Y. *et al.* (2016) « Deep Feature Extraction and Classification of Hyperspectral Images Based on Convolutional Neural Networks », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10), p. 6232-6251. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2584107.

Ciatti, M. et Frosinini, C. (éd.) (2018) *Il restauro dell'adorazione dei Magi di Leonardo. La riscoperta di un capolavoro*. EDIFIR.

Cochin, C.N. (1773) *Voyage d'Italie ou recueil de notes sur les ouvrages de peinture et de sculpture, qu'on voit dans les principales villes d'Italie*. Chez Ch. Ant. Jombert.

Colantoni, P. *et al.* (2006) « Analysis of multispectral images of paintings », in *2006 14th European Signal Processing Conference*. *2006 14th European Signal Processing Conference*, p. 1-5. Disponible sur: https://ieeexplore.ieee.org/document/7071757 (Consulté le: 20 mai 2024).

Colantoni, P. et Thomas, J.-B. (2009) « A Color Management Process for Real Time Color Reconstruction of Multispectral Images », in A.-B. Salberg, J.Y. Hardeberg, et R. Jenssen (éd.) *Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 128-137. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02230-2_14.

Comaniciu, D. et Meer, P. (2002) « Mean shift: a robust approach toward feature space analysis », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5), p. 603-619. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/34.1000236.

Cosentino, A. (2014) « Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method », *Heritage Science*, 2(1), p. 8. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/2050-7445-2-8.

Cosentino, A. (2015) « Multispectral imaging and the art expert », *Spectroscopy Europe*, 27.

Cotte, P. (1996) « Appareil photographique a enregistrement numérique direct de l'image utilisant une fibre optique ». Paris.

Cotte, P. (2014) *Lumiere on The Lady with an Ermine Leonardo da Vinci. Unprecedented Discoveries*. 1st édition. France: Vinci Editions.

Cotte, P. (2015) *Lumiere on the Mona Lisa : Hidden portraits*. Saint-Fargeau-Ponthierry: Vinci Editions.

Cotte, P. et Dupouy, M. (1998) « Patent for Hight resolution device for large size documents. » Paris.

Cotte, P. et Dupouy, M. (2003) « Crisatel High Resolution Multispectral System », in *PICS 2003: The PICS Conference, An International Technical Conference on The Science and Systems of Digital Photography, including the Fifth International Symposium on Multispectral Color Science, May 13, 2003, Rochester, NY, USA*. IS&T - The Society for Imaging Science and Technology, p. 161-165. Disponible sur: http://www.imaging.org/store/epub.cfm?abstrid=8477.

Cotte, P. et Dupraz, D. (2006a) « Spectral imaging of Leonardo Da Vinci's Mona Lisa: A true color smile without the influence of aged varnish », in *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, p. 311-317. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CGIV.2006.3.1.art00064.

Cotte, P. et Dupraz, D. (2006b) « Spectral imaging of Leonardo Da Vinci's Mona Lisa: An authentic smile at 1523 dpi with additional infrared data », in *Archiving Conference*. Society of Imaging Science and Technology, p. 228-235.

Cucci, C. *et al.* (2019) « Short-wave infrared reflectance hyperspectral imaging for painting investigations: A methodological study », *Journal of the American Institute for Conservation*, 58(1-2), p. 16-36. Disponible sur: https://doi.org/10.1080/01971360.2018.1543102.

Cucci, C., Delaney, J.K. et Picollo, M. (2016) « Reflectance Hyperspectral Imaging for Investigation of Works of Art: Old Master Paintings and Illuminated Manuscripts », *Accounts of Chemical Research*, 49(10), p. 2070-2079. Disponible sur: https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00048.

Curie, P. (2012) « Restaurer la Sainte Anne », in V. Delieuvin (éd.) *La Sainte Anne: L'ultime chef-d'oeuvre de Léonard De Vinci*. Illustrated édition. Paris Milan: Officina Libraria, p. 366-380.

Currie, C. et Allart, D. (2012) « The Brueg(H)el Phenomenon », *CeROArt. Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art* [Preprint], (8). Disponible sur: https://doi.org/10.4000/ceroart.2887.

Czop, J. *et al.* (2015) « Leonardo da Vinci Lady with an Ermine - the latest research into the artist's painting technique and the state of preservation of the painting », *Selected Papers from the National Museum in Cracow. New Series.*, VIII, p. 229-259. Disponible sur: https://doi.org/10.12797/RMNwK.082015.08.09.

Daffara, C. *et al.* (2010) « Scanning Multispectral IR Reflectography SMIRR: An Advanced Tool for Art Diagnostics », *Accounts of Chemical Research*, 43(6), p. 847-856. Disponible sur: https://doi.org/10.1021/ar900268t.

Daffara, C. et Fontana, R. (2011) « Multispectral infrared reflectography to differentiate features in paintings », *Microscopy and Microanalysis: The Official Journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada*, 17(5), p. 691-695. Disponible sur: https://doi.org/10.1017/S1431927611000031.

Davies, H. et Zawacki, A. (2019) « Making Light Work: Manuscripts and Multispectral Imaging ».

Delaney, J. *et al.* (2005) « Multispectral imaging of paintings in the infrared to detect and map blue pigments », in *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis*. National Academies Press. Washington DC, p. 120-136.

Delaney, J. *et al.* (2024) « Leonardo da Vinci's Ginevra de' Benci: The palette and further observations on underdrawing and undermodeling », *Technè*, Hors-série, p. 76-85. Disponible sur: https://doi.org/10.4000/11v44.

Delaney, J.K. *et al.* (2016) « Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography », *Heritage Science*, 4(1), p. 6. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-016-0075-4.

Delaney, J.K., Trumpy, G., *et al.* (2017) « A high sensitivity, low noise and high spatial resolution multi-band infrared reflectography camera for the study of paintings and works on paper », *Heritage Science*, 5(1), p. 32. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-017-0146-1.

Delaney, J.K., Dooley, K.A., *et al.* (2017) « Macroscale multimodal imaging reveals ancient painting production technology and the vogue in Greco-Roman Egypt », *Scientific Reports*, 7(1), p. 15509. Disponible sur: https://doi.org/10.1038/s41598-017-15743-5.

Delieuvin, V. et Collectif (éd.) (2012) *La Sainte Anne: L'ultime chef-d'oeuvre de Léonard De Vinci*. Illustrated édition. Paris Milan: Officina Libraria.

Dijk, S.J. van (2015) *« Beauty adorns virtue »*. Leiden University. Disponible sur: https://hdl.handle.net/1887/33552 (Consulté le: 8 novembre 2024).

Dong, P. *et al.* (2008) « Investigation on the Modeling and Ageing Characteristics of the HID Car Headlight Automotive System », *Key Engineering Materials*, 364-366, p. 1280-1284. Disponible sur: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.1280.

Dupraz, D. *et al.* (2005) « Evaluation of six and eleven-channel high definition multispectral camera for fine art painting application », *AIC 05*. AIC 2005, Proceedings of the 10th Congress of the International Color Association, p. 379-382.

Dupuis, G., Elias, M. et Simonot, L. (2002) « Pigment Identification by Fiber-Optics Diffuse Reflectance Spectroscopy », *Applied Spectroscopy*, 56(10), p. 1329-1336. Disponible sur: https://doi.org/10.1366/000370202760354803.

Easton, R.L., Christens-Barry, W.A. et Knox, K.T. (2011) « Spectral image processing and analysis of the Archimedes Palimpsest », in *2011 19th European Signal Processing Conference*. *2011 19th European Signal Processing Conference*, p. 1440-1444. Disponible sur: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7073928 (Consulté le: 23 juillet 2025).

Elias, M. *et al.* (2004) « Bi-directional reflectance of a varnished painting: Part 2: Comparison between the effects of the refractive indices, of the surface states and of the absorption of the varnish – experiments and simulations », *Optics Communications*, 231(1), p. 25-33. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2003.12.008.

Elias, M. *et al.* (2006) « Modification of the surface state of rough substrates by two different varnishes and influence on the reflected light », *Optics Communications*, 266(2), p. 586-591. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.05.051.

Elias, M. et Cotte, P. (2008) « Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa », *Applied optics*, 47, p. 2146-54. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/AO.47.002146.

Elias, M. et Elias, G. (2004) « Radiative transfer in inhomogeneous stratified scattering media with use of the auxiliary function method », *JOSA A*, 21(4), p. 580-589. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSAA.21.000580.

Elias, M. et Simonot, L. (2006) « Separation between the different fluxes scattered by art glazes: explanation of the special color saturation », *Applied Optics*, 45(13), p. 3163-3172. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/AO.45.003163.

Eveno, M. *et al.* (2019) « L'art de la matière, l'art et la manière », in Delieuvin, V. et Frank, L., *Léonard de Vinci, Catalogue de l'exposition*. Illustrated édition. Paris: Hazan, p. 358-369.

Farin, G. (1993) « Chapter 9 - Cubic Spline Interpolation », in G. Farin (éd.) *Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design (Third Edition)*. Boston: Academic Press, p. 133-155. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-249052-1.50014-3.

Faton, J. (2012) « Léonard, une révolution de la peinture », *Dossier de l'Art*, p. 46-47.

Fazlali, F. et Gorji Kandi, S. (2020) « Identification of pigments in artworks by inverse tangent derivative of spectrum and a new filtering method », *Heritage Science*, 8(1), p. 93. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-020-00438-4.

Flesch, P. et Neiger, M. (2004) « Ac modelling of D2 automotive HID lamps including plasma and electrodes », *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(20), p. 2848. Disponible sur: https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/20/011.

Fonseca, B. *et al.* (2019) « Seeing red: towards an improved protocol for the identification of madder- and cochineal-based pigments by fiber optics reflectance spectroscopy (FORS) », *Heritage Science*, 7(1), p. 92. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-019-0335-1.

Franck, J. (1993) « The Unrestorable Sfumato », *UCLA*, VI, p. 238.

Frank, L. (2019) « Terreur et Modernité », in Delieuvin, V., *Léonard de Vinci, Catalogue de l'exposition*. Illustrated édition. Paris: Hazan, p. 226.

Freitas, R.P. de *et al.* (2024) « Development of a Macro X-ray Fluorescence (MA-XRF) Scanner System for In Situ Analysis of Paintings That Operates in a Static or Dynamic Method », *Quantum Beam Science*, 8(4), p. 26. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/qubs8040026.

Frick, C.C. (2005) *Dressing Renaissance Florence*. Johns Hopkins University Press. Disponible sur: https://doi.org/10.56021/9780801869396.

Fritsch, F.N. et Carlson, R.E. (1980) « Monotone Piecewise Cubic Interpolation », *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17(2), p. 238-246. Disponible sur: https://doi.org/10.1137/0717021.

Gao, Z. *et al.* (2023) « Application of hyperspectral imaging technology to digitally protect murals in the Qutan temple », *Heritage Science*, 11(1), p. 8. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-022-00847-7.

Gargano, M., Ludwig, N. et Poldi, G. (2007) « A new methodology for comparing IR reflectographic systems », *Infrared Physics & Technology*, 49(3), p. 249-253. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.013.

Gelb, M.J. (1999) *The How to Think Like Leonardo da Vinci Workbook: Your Personal Companion to How to Think Like Leonardo da Vinci*. Workbook ed. edition. Dell.

Gettens, R.J., Kühn, H. et Chase, W.T. (1993) « Artists' Pigments », *National Gallery of Art, Washington*, 2, p. 231.

Ghamisi, P. *et al.* (2017) « Advanced Spectral Classifiers for Hyperspectral Images: A review », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(1), p. 8-32. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2616418.

Giorgiutti-Dauphiné, F. et Pauchard, L. (2016) « Painting cracks: A way to investigate the pictorial matter », *Journal of Applied Physics*, 120(6), p. 065107. Disponible sur: https://doi.org/10.1063/1.4960438.

Gnignera, E. (2010) « Foggia alla francese », in *I Soperchi ornamenti. Copricapi e acconciature femminili nell'Italia del Quattrocento*. Protagon Editori Toscani, p. 127.

Gnignera, E. (2016a) « Vesti, acconciatura e cosmèsi, agucchie da pomella », in *La Bella svelata*. Edizioni d'Arte. Bologna: Scripta Maneant, p. 67-81.

Gnignera, E. (2016b) « Vesti, acconciatura e cosmèsi, suntuarie », in *La Bella svelata*. Edizioni d'Arte. Bologna: Scripta Maneant, p. 115.

Gnignera, E. (2016c) « Vesti, acconciaturra a cosmèsi, gamurra e finestrelle », in *La Bella svelata*. Edizioni d'Arte. Bologna: Scripta Maneant, p. 204, 207.

Gnignera, E. (2020) « L'agucchia della Gioconda / L'aiguillette de Monna Lisa ».

Gombrich, E.H. (2000) *The story of art*. 16e édition. Phaidon Press, Ltd.

Gonzalez, R.C. (2019) *Digital Image Processing, 4Th Edition*. 4th edition. PEARSON INDIA.

Gruninger, J. et Sundberg, R. (1995) « The Determination of Spectral Components of Multispectral Images », in *Optical Remote Sensing of the Atmosphere (1995), paper TuB6*. *Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Optica Publishing Group, p. TuB6. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/ORSA.1995.TuB6.

Guest, D., Cranmer, K. et Whiteson, D. (2018) « Deep Learning and Its Application to LHC Physics », *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 68(Volume 68, 2018), p. 161-181. Disponible sur: https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-021019.

Gysembergh, V. *et al.* (2023) « Ptolemy's treatise on the meteoroscope recovered », *Archive for History of Exact Sciences*, 77(2), p. 221-240. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/s00407-022-00302-w.

Han, X. et Yang, J. (2020) « A two-step method for interpolating interval data based on cubic hermite polynomial models », *Applied Mathematical Modelling*, 81, p. 356-371. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.12.013.

Hardeberg, J. (1999) *Acquisition et reproduction d'images couleur : approches colorimétrique et multispectrale*. phdthesis. Télécom ParisTech. Disponible sur: https://pastel.hal.science/tel-00005657 (Consulté le: 20 mai 2024).

Hardeberg, J.Y. *et al.* (1998) « Multispectral imaging in multimedia », in *Proc. CIM'98 Colour Imaging in Multimedia*. Derby, UK.: Citeseer, p. 75-86.

Hardeberg, J.Y. *et al.* (1999) « Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes », *Colour imaging: vision and technology*, p. 145-164.

Hecht, E. (2020) *Optics, 5th edition*. Pearson India.

Herald, J. (1981) *Renaissance Dress in Italy 1400-1500*. Humanities Pr.

Hernández-Andrés, J. *et al.* (2001) « Color and spectral analysis of daylight in southern Europe », *JOSA A*, 18(6), p. 1325-1335. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSAA.18.001325.

Hoffer, R. et Miller, L. (1965) « POTENTIAL APPLICATIONS OF REVOTE MULTISPECTRAL SENSING IN AGRICULTURE », *30th Semi-Annual Convention of the American Society of Photogrammetry*, 24 septembre. Disponible sur: https://www.lars.purdue.edu/home/references/LTR_092465.pdf.

Hours, M. (1964) *Les secrets des chefs d'oeuvre*. Nouv. éd édition. Paris: ROBERT LAFFONT.

Houston, W.V. (1927) « A Compound Interferometer for Fine Structure Work », *Physical Review*, 29(3), p. 478-484. Disponible sur: https://doi.org/10.1103/PhysRev.29.478.

Imai, F., Rosen, M. et Berns, R. (2002) « Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality », *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, 1. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CGIV.2002.1.1.art00103.

Imai, F., Taplin, L. et Day, E. (2002) « Comparison of the accuracy of various transformations from multi-band images to reflectance spectra », *Munsell Color Science Laboratory (MCSL)* [Preprint]. Disponible sur: https://repository.rit.edu/article/923.

Imai, F.H. (1996) « Principal component analysis of skin color and its application to colorimetric color reproduction on CRT display and hardcopy », *Journal of Imaging Science and Technology*, 40(5), p. 422-430.

Imai, F.H. *et al.* (1996) « Spectral Reflectance of Skin Color and its Applications to Color Appearance Modeling », in *International Conference on Communications in Computing*. Disponible sur: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:33015834.

Imai, F.H., Tsumura, N. et Haneishi, H. (1996) « Spectral Reflectance of Skin Color and its Applications to Color Appearance Modeling », *Color and Imaging Conference*, 4, p. 121-124. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.1996.4.1.art00032.

Jacobson, R. *et al.* (2000) *Manual of Photography*. Taylor & Francis.

Jenal, A. *et al.* (2023) « A New Multispectral VNIR/SWIR Imaging System for UAVs to Monitor Crop Traits », in *IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 4635-4637. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282679.

Jin, X. et Hirakawa, K. (2012) « Analysis and processing of pixel binning for color image sensor », *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, p. 1-15.

Jolliffe, I.T. (2002) *Principal Component Analysis*, *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag (Springer Series in Statistics). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/b98835.

Kades, L. *et al.* (2020) « Spectral reconstruction with deep neural networks », *Physical Review D*, 102(9), p. 096001. Disponible sur: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.096001.

Karpowicz, A. (1990) « A Study on Development of Cracks on Paintings », *Journal of the American Institute for Conservation*, 29(2), p. 169-180. Disponible sur: https://doi.org/10.2307/3179581.

Keith, L. (2011) « In pursuit of perfection. », in Syson, L., *Leonardo da Vinci: painter at the court of Milan*. London: National Gallery, p. 54-77.

Kemp, M. (2006) *Leonardo da Vinci: the marvellous works of nature and man*. Rev. ed. Oxford: Oxford University Press. Disponible sur: http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=422632 (Consulté le: 1 septembre 2024).

Kemp, M. et Cotte, P. (2012) *La Bella principessa di Leonardo da Vinci: ritratto di Bianca Sforza*. Ed. aggiornata e riv. in lingua italiana. Firenze: Mandragora.

Kemp, M. et Pallanti, G. (2017) *Mona Lisa: The People and the Painting*. 1st edition. Oxford University Press.

Kern, J.P. et Pattichis, M.S. (2007) « Robust Multispectral Image Registration Using Mutual-Information Models », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), p. 1494-1505. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.892599.

Keusen, T. (1995) « Multispectral color system with an encoding format compatible with the conventional tristimulus model », in *Proceedings of IS&T*. Society for Imaging Science and Technology, p. 510-515.

Killerby, C.K. (2002) *Sumptuary Law in Italy 1200-1500*. Oxford, New York: Oxford University Press (Oxford Historical Monographs).

Kingma, D.P. et Welling, M. (2022) « Auto-Encoding Variational Bayes ». arXiv. Disponible sur: https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114.

Kleynhans, T. *et al.* (2021) « Low-Cost Multispectral System Design for Pigment Analysis in Works of Art », *Sensors*, 21, p. 5138. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/s21155138.

Koenig, F. et Praefcke, W. (1998) « Practice of multispectral image acquisition », in *Electronic Imaging: Processing, Printing, and Publishing in Color*. *Electronic Imaging: Processing, Printing, and Publishing in Color*, SPIE, p. 34-41. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.324094.

Kollarits, R.V. et Gibbon, D.C. (1992) « Improving the color fidelity of cameras for advanced television systems », in *High-Resolution Sensors and Hybrid Systems*. *High-Resolution Sensors and Hybrid Systems*, SPIE, p. 19-29. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.135891.

Kontsevich, L.L. et Tyler, C.W. (2004) « Making Mona Frown », *Science*, 304(5679), p. 1900-1900. Disponible sur: https://doi.org/10.1126/science.304.5679.1900b.

Kubelka, P. (1948) « New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part I », *JOSA*, 38(5), p. 448-457. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000448.

Kubelka, P. (1954) « New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part II: Nonhomogeneous Layers* », *JOSA*, 44(4), p. 330-335. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000330.

Kubelka, P. et Munk, F. (1931) « Ein Beitrag zür Optik der Farbanstriche », *Zeitschrift für*, (11a), p. 593-601.

Lahanier, C. *et al.* (2002) « CRISATEL: high definition spectral digital imaging of paintings with simulation of varnish removal », in *ICOM Committee for Conservation*. *13th Triennial Meeting*, Rio de Janeiro: ICOM-CC, p. 295-300.

Lahanier, C. *et al.* (2003) « Multi-spectral Digitisation and 3D Modelling of Paintings and Objects for Image Content Recognition », *International Conference of Museum Digitization*, p. 157-201.

Lahanier, C. *et al.* (2004) « Digital capture of archive, objects and paintings for research and conservation », *Electronics and Visual Arts, Florence, Italy* [Preprint].

Lahanier, C. *et al.* (2005) « Twodimensional multi-spectral digitization and three-dimensional modeling of easel paintings », *Proccedings of the 14th Triennal ICOM-CC Meeting*, 1.

Lambert, E. (2006) « Photographic imaging plate 24 », in Mohen, J.-P., *Mona Lisa: Inside the Painting*. First Edition. Harry N. Abrams, Inc., p. 81.

Lapray, P.-J. *et al.* (2017) « Energy balance in Spectral Filter Array camera design », *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 13(1), p. 1. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s41476-016-0031-7.

Latour, G., Elias, M. et Frigerio, J.M. (2007) « Color modeling of stratified pictorial layers using the radiative transfer equation solved by the auxiliary function method », *JOSA A*, 24(10), p. 3045-3053. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.003045.

Laureti, S. *et al.* (2019) « Looking Through Paintings by Combining Hyper-Spectral Imaging and Pulse-Compression Thermography », *Sensors*, 19(19), p. 4335. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/s19194335.

Laval, E., Pagès-Camagna, S. et Walter, P. (2006) « Analysis of the paint layer (of Mona Lisa) », in Mohen, J.-P., *Mona Lisa: Inside the Painting*. First Edition. Harry N. Abrams, Inc., p. 86-89.

Leonardo, da V. (1956) *Treatise on painting Translated and annotated by A. Philip McMahon.* Princeton: University Press (Biblioteca apostolica vaticana).

Li, Y. *et al.* (2017) « Hyperspectral image super-resolution using deep convolutional neural network », *Neurocomputing*, 266, p. 29-41. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.024.

Liang, H., Saunders, D. et Cupitt, J. (2005) « A new multispectral imaging system for examining paintings », *Journal of Imaging Science and Technology*, 49, p. 551-562.

Linhares, J.M.M. *et al.* (2020) « How Good Are RGB Cameras Retrieving Colors of Natural Scenes and Paintings?—A Study Based on Hyperspectral Imaging », *Sensors*, 20(21), p. 6242. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/s20216242.

Livingstone, M.S. (2000) « Is It Warm? Is It Real? Or Just Low Spatial Frequency? », *Science*, 290(5495), p. 1299-1299. Disponible sur: https://doi.org/10.1126/science.290.5495.1299b.

Lomazzo, G.P. (2019) *Trattato Dell'arte Della Pittura, Scoltura, Et Architettura Di Gio. Paolo Lomazzo Milanese Pittore, Diviso in Sette Libri: Ne' Quali Si Discorre de la ... de la Prattica de la Pittura, Et Finalme*. Forgotten Books.

London, B., Upton, J. et Stone, J. (2013) *Photography*. Pearson. Disponible sur: https://books.google.fr/books?id=8f1WMQEACAAJ.

Lucet, G. (2013) « 3D SURVEY OF PRE-HISPANIC WALL PAINTING WITH HIGH RESOLUTION PHOTOGRAMMETRY », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5-W1, p. 191-196. Disponible sur: https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-191-2013.

Maître, H. *et al.* (1996) « Spectrophotometric Image Analysis of Fine Art Paintings », in *Color and Imaging Conference*, p. 50-53. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.1996.4.1.art00014.

Malacara-Hernández, D. (2013) *Handbook of Optical Design*. 3e édition. Boca Raton, FL: CRC Press Inc.

Mallat, S. (2008) *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. 3rd edition. Amsterdam ; Boston: Academic Press.

Mallat, S.G. (1989) « A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), p. 674-693. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/34.192463.

Mandal, D.J. *et al.* (2023) « An Experiment-based Comparative Analysis of Pigment Classification Algorithms using Hyperspectral Imaging », *Journal of Imaging Science and Technology*, 67, p. 1-18. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2023.67.3.030403.

Marcotte, D., Cotte, P. et Cohen-Skalli, A. (2022) « Pour une relecture du palimpseste de Strabon », *The Vatican Library Review*, 1(2), p. 193-203. Disponible sur: https://doi.org/10.1163/27728641-00102006.

Martinez, K., Cupitt, J. et Saunders, D. (1993) « High resolution colorimetric imaging of paintings », in. *SPIE Cameras, Scanners and Image Acquisition Systems (01/02/93)*, p. 25-36. Disponible sur: https://eprints.soton.ac.uk/250683/ (Consulté le: 19 mai 2024).

Matanga, J. (2020) *Study and realization of a multispetral detector(filter) by non destructive spectral dispersion through te nanostructure film*. phdthesis. Université Bourgogne Franche-Comté ; Université de Douala. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-03130989 (Consulté le: 22 juillet 2025).

Matteucci, C. *et al.* (2015a) *Storia e diagnosi di testimonianze leonardesche. Vol. 1: Ritratto di gentildonna*. Poggio a Caiano (Prato): CB Edizioni.

Matteucci, C. *et al.* (2015b) *Storia e diagnosi di testimonianze leonardesche. Vol. 2: Flora*. CB Edizioni. Disponible sur: https://www.unilibro.it/libro/storia-e-diagnosi-di-testimonianze-leonardesche-vol-2-flora/9788897644408 (Consulté le: 21 mai 2024).

Matteucci, C. *et al.* (2016) *Storia e diagnosi di testimonianze leonardesche. Vol. 3: Maddalena al Sarcofago*. CB Edizioni. Disponible sur: https://www.abebooks.it/9788897644446/Storia-diagnosi-testimonianze-leonardesche-Maddalena-8897644449/plp (Consulté le: 21 mai 2024).

Mazzocato, S., Cimino, D. et Daffara, C. (2024) « Integrated microprofilometry and multispectral imaging for full-field analysis of ancient manuscripts », *Journal of Cultural Heritage*, 66, p. 110-116. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.11.014.

Mercuri, F. *et al.* (2014) « Infrared Thermography Applied to the Study of Cultural Heritage », *International Journal of Thermophysics*, 36. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/s10765-014-1645-x.

Mohen, J.-P. (2006) *Mona Lisa: Inside the Painting*. First Edition. Harry N. Abrams, Inc.

Moore, E.H. (1920) « On the Reciprocal of the General Algebraic Matrix », *the American Mathematical Society*. Bulletin of the AMS, p. 394-395.

Mottin, B. (2006) « Reading the Image in Mona lisa Inside the Painting », in Mohen, J.-P., *Mona Lisa: Inside the Painting*. First Edition. Harry N. Abrams, Inc., p. 67.

O'Hanlon, G. (2024) *Natural Pigments*, *Why Some Paints are Transparent and Others Opaque*. Disponible sur: https://www.naturalpigments.eu/artist-materials/transparent-opaque-paints (Consulté le: 14 juin 2024).

Ono, S. et Matsuda, Y. (2019) « Development of a multispectral RTI system to evaluate varnish cleaning ».

O'Sullivan, J.D., Hoy, P.R. et Rutt, H.N. (2011) « An Extended Spectral Angle Map for Hyperspectral and Multispectral Imaging », in *CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications (2011), paper CMG2*. *CLEO: Science and Innovations*, Optica Publishing Group, p. CMG2. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2011.CMG2.

Padfield, T. et Landi, S. (1966) « The Light-Fastness of the Natural Dyes », *Studies in Conservation*, 11(4), p. 181-196. Disponible sur: https://doi.org/10.2307/1505361.

Pallipurath, A.R. *et al.* (2016) « Estimation of semiconductor-like pigment concentrations in paint mixtures and their differentiation from paint layers using first-derivative reflectance spectra », *Talanta*, 154, p. 63-72. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.052.

Palmer, D., Borstad, G. et Boxall, S. (2011) « Airborne Multispectral Remote Sensing of the January 1993 Shetlands Oil Spill », in. Disponible sur: https://www.semanticscholar.org/paper/Airborne-Multispectral-Remote-Sensing-of-the-1993-Palmer-Borstad/9015817b2d3e5ed60936175e24e45571bcaccf2d (Consulté le: 19 mai 2024).

Palomero, C.M.T. et Soriano, M.N. (2011) « After digital cleaning: visualization of the dirt layer », in *Computer Vision and Image Analysis of Art II*. *Computer Vision and Image Analysis of Art II*, SPIE, p. 207-213. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.876662.

Panofsky, E. (2010) *Les Primitifs flamands*. Paris: Hazan.

Papadakis, V.M. *et al.* (2011) « IRIS: a novel spectral imaging system for the analysis of cultural heritage objects », in *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III*. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III*, SPIE, p. 233-238. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.889510.

Pauchard, L. *et al.* (2007) « Craquelures dans les couches picturales des peintures d'art », *Reflets de la Physique*, (3), p. 5-9.

Pedretti, C. (1973) *Leonardo; A Study in Chronology and Style*. First Edition. University of California Press.

Pelagotti, A. *et al.* (2008) « Multispectral imaging of paintings », *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(4), p. 27-36. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/MSP.2008.923095.

Penrose, R. (1955) « A generalized inverse for matrices », in *Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society*. Cambridge University Press, p. 406-413.

Perego, F. (2005) *Le dictionnaire des matériaux du peintre*. BELIN.

Perez-Rodriguez, J.L. *et al.* (2014) « Wall paintings studied using Raman spectroscopy: A comparative study between various assays of cross sections and external layers », *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 120, p. 602-609. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.10.052.

Picollo, M. *et al.* (2000) « Fiber Optics Reflectance Spectroscopy: A Non-destructive Technique for the Analysis of Works of Art », in S. Martellucci, A.N. Chester, et A.G. Mignani (éd.) *Optical Sensors and Microsystems: New Concepts, Materials, Technologies*. Boston, MA: Springer US, p. 259-265. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/0-306-47099-3_23.

Pingi, P. (2016) « La restauración del Retrato Trivulzio de Antonello da Messina ». Disponible sur: https://www.academia.edu/125021287/La_restauraci%C3%B3n_del_Retrato_Trivulzio_de_Antonello_da_Messina (Consulté le: 23 juillet 2025).

Pinna, D., Galeotti, M. et Mazzeo, R. (2010) *Scientific Examination for the Investigation of Paintings: A Handbook for Conservator-restorers*. Centro Di.

Platania, E. *et al.* (2020) « Identification of green pigments and binders in late medieval painted wings from Norwegian churches », *Microchemical Journal*, 156, p. 104811. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104811.

Pomarède, V. (1988) *La joconde*. PRAT / EUROPA.

Pottier, F. *et al.* (2018) « Simulating the composition and structuration of coloring layers in historical painting from non-invasive spectral reflectance measurements », *Comptes Rendus Physique*, 19(7), p. 599-611. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.09.007.

Praefcke, W. et Keusen, T. (1995) « Optimized Basis Functions for Coding Reflectance Spectra Minimizing the Visual Color Difference », in *3rd Color and Imaging Conference, CIC 1995, Scottsdale, Arizona, USA, November 7-10, 1995*. Society for Imaging Science and Technology, p. 37-40. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.1995.3.1.ART00010.

Pratt, W.K. (1978) *Digital Image Processing*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Pratt, W.K. et Mancill, C.E. (1976) « Spectral estimation techniques for the spectral calibration of a color image scanner », *Applied Optics*, 15(1), p. 73-75. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/AO.15.000073.

Preisler, Z. *et al.* (2024) « Deep learning for enhanced spectral analysis of MA-XRF datasets of paintings », *Science Advances*, 10(39), p. eadp6234. Disponible sur: https://doi.org/10.1126/sciadv.adp6234.

Queiros-Conde, D. (2004) « The Turbulent Structure of Sfumato within Mona Lisa », *Leonardo*, 37(3), p. 223-228. Disponible sur: https://doi.org/10.1162/0024094041139490.

Radpour, R. *et al.* (2022) « Identification and mapping of ancient pigments in a Roman Egyptian funerary portrait by application of reflectance and luminescence imaging spectroscopy », *Heritage Science*, 10(1), p. 8. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/s40494-021-00639-5.

Rainey, R.E. (1985) *Sumptuary Legislation in Renaissance Florence: Ronald E. Rainey*. Columbia University.

Ribés, A. *et al.* (2003) « Color and Multispectral Imaging with the Crisatel Multispectral System », in *PICS 2003: The PICS Conference, An International Technical Conference on The Science and Systems of Digital Photography, including the Fifth International Symposium on Multispectral Color Science, May 13, 2003, Rochester, NY, USA*. IS&T - The Society for Imaging Science and Technology, p. 215-219.

Ribés, A. *et al.* (2004) « Calibration and Spectral Reconstruction for an Art Painting Multispectral Acquisition System », *CGIV Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, 2, p. 403-408. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CGIV.2004.2.1.art00081.

Ribes, A. *et al.* (2005) « Calibration and Spectral Reconstruction for CRISATEL: an Art Painting Multispectral Acquisition System », *Journal of Imaging Science and Technology*, 49.

Ribés, A. et Schmit, F. (2002) « Reconstructing Spectral Reflectances with Mixture Density Networks », *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, 1, p. 486-491. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CGIV.2002.1.1.art00102.

Ribes, A. et Schmit, F. (2003) « A fully automatic method for the reconstruction of spectral reflectance curves by using mixture density networks », *Pattern Recognition Letters*, 24(11), p. 1691-1701. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/S0167-8655(02)00325-2.

Ribes, A. et Schmit, F. (2008) « Studying That Smile », *IEEE Signal Processing Magazine* [Preprint]. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/MSP.2008.923091.

Ribes, A., Schmit, F. et Brettel, H. (2001) « Reconstructing Spectral Reflectances of Oil Pigments with Neural Networks », in *ResearchGate*. *Conf. Multispectral Color Science*, Joensuu, Finland.

Ribes, A. et Schmitt, F. (2008) « Linear inverse problems in imaging », *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(4), p. 84-99. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/MSP.2008.923099.

Ribés Cortés, A. (2003) *Analyse multispectrale et reconstruction de la réflectance spectrale de tableaux de maître*. PhD Thesis. Disponible sur: http://www.theses.fr/2003ENST0035.

Ricci, M. *et al.* (2021) « Surface and Interface Investigation of a 15th Century Wall Painting Using Multispectral Imaging and Pulse-Compression Infrared Thermography », *Coatings*, 11(5), p. 546. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/coatings11050546.

Richter, J.-P. (1883) « VI The Artist's materials », in *Scritti letterari di Leonardo da Vinci*. Londre: Sampson. Low, Marston, Searle and Rivington, p. 315-324.

Roy, A., Spring, M. et Plazzotta, C. (2004) « Raphael's Early Work in the National Gallery: Paintings before Rome », *The National Gallery Technical Bulletin*, 25, p. 4-35.

Rueckert, D. *et al.* (1999) « Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images », *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 18(8), p. 712-721. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/42.796284.

Saunders, D. et Cupitt, J. (1993) « Image Processing at the National Gallery: The VASARI Project », *National Gallery*, 14, p. 72-85.

Schmitt, F. *et al.* (2005) « CRISATEL multispectral imaging system », *AIC 05*. AIC 2005, Proceedings of the 10th Congress of the International Color Association, p. 463-468.

Schulthess, U. *et al.* (2013) « Mapping field-scale yield gaps for maize: An example from Bangladesh », *Field Crops Research*, 143, p. 151-156. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.004.

Sève, R. (1996) *Physique De La Couleur. De L'Apparence Coloree A La Technique Colorimetrique*. Dunod.

Shiobara, T. *et al.* (1995) « Improved color reproduction of electronic endoscopes », in *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, p. 186-190. Disponible sur: https://library.imaging.org/admin/apis/public/api/ist/website/downloadArticle/cic/3/1/art00049 (Consulté le: 19 mai 2024).

Shrestha, R. et Hardeberg, J.Y. (2014) « Evaluation and comparison of multispectral imaging systems », *Color and Imaging Conference*, 22, p. 107-112. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.2014.22.1.art00018.

Shrestha, R., Mansouri, A. et Hardeberg, J.Y. (2011) « Multispectral imaging using a stereo camera: concept, design and assessment », *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1), p. 57. Disponible sur: https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-57.

Siatou, A. *et al.* (2022) « New methodological approaches in Reflectance Transformation Imaging applications for conservation documentation of cultural heritage metal objects », *Journal of Cultural Heritage*, 58, p. 274-283. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.10.011.

Siddall, R. (2018) « Mineral Pigments in Archaeology: Their Analysis and the Range of Available Materials », *Minerals*, 8(5), p. 201. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/min8050201.

Simonot, L. (2021) *Essai d'optique sur la gradation de la lumière de Pierre Bouguer (1729)*.

Simonot, L., Elias, M. et Charron, E. (2004) « Special visual effect of art glazes explained by the radiative transfer equation », *Applied Optics*, 43(12), p. 2580-2587. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/AO.43.002580.

Strausbaugh, T.D. et Gann, R.G. (2002) « Migration from Contrast Transfer Function to ISO 16067-1 Spatial Frequency Response », in *Is And Ts Pics Conference*. SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE & TECHNOLOGY, p. 136-141.

Sugitani, A. *et al.* (2006) « Theoretical and experimental investigation of an hid lamp », in *The 33rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2006. ICOPS 2006. IEEE Conference Record - Abstracts. The 33rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2006. ICOPS 2006. IEEE Conference Record - Abstracts.*, p. 129-129. Disponible sur: https://doi.org/10.1109/PLASMA.2006.1707001.

Syson, L. et Billinge, R. (2005) « Leonardo da Vinci's Use of Underdrawing in the "Virgin of the Rocks" in the National Gallery and "St. Jerome" in the Vatican », *The Burlington Magazine*, 147, p. 450-463. Disponible sur: https://doi.org/10.2307/20074037.

Szeliski, R. (2007) « Image Alignment and Stitching: A Tutorial », *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 2(1), p. 1-104. Disponible sur: https://doi.org/10.1561/0600000009.

Thomas, J.-B., Lapray, P.-J. et Le Moan, S. (2025) « Trends in Snapshot Spectral Imaging: Systems, Processing, and Quality », *Sensors*, 25(3), p. 675. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/s25030675.

Thomson, G.C. (2016) *Museum Environment*. 2e éd. London: Routledge. Disponible sur: https://doi.org/10.4324/9780080512310.

Tinagli, P. (1997) *Women in Italian Renaissance Art: Gender, Representation, Identity*. The Essential Readings. Manchester Univ Pr (The Essential Readings).

Tominaga, S. (1996) « Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions », *JOSA A*, 13(11), p. 2163-2173. Disponible sur: https://doi.org/10.1364/JOSAA.13.002163.

Tominaga, S. (1997) « Computational approach and a multi-channel vision system », in. *AIC Color 97*, Kyoto, Japan, p. 71-76.

Valušis, G. *et al.* (2021) « Roadmap of Terahertz Imaging 2021 », *Sensors*, 21(12), p. 4092. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/s21124092.

Vasari, G. (1550) *Vite De Più Eccellenti Pittori, Scultori e Architetti*. Forgotten Books.

Vasco, G. *et al.* (2024) « Development of a Hyperspectral Imaging Protocol for Painting Applications at the University of Seville », *Heritage*, 7(11), p. 5986-6007. Disponible sur: https://doi.org/10.3390/heritage7110281.

Verinaz-Jadan, H. *et al.* (2024) « Adversarial Deep-Unfolding Network for MA-XRF Super-Resolution on Old Master Paintings Using Minimal Training Data ». arXiv. Disponible sur: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.09483.

Viguerie, L. *et al.* (2010) « Revealing the sfumato Technique of Leonardo da Vinci by X-Ray Fluorescence Spectroscopy », *Angewandte Chemie International Edition*, 49(35), p. 6125-6128. Disponible sur: https://doi.org/10.1002/anie.201001116.

Vinci, L. de et Chastel, A. (2003) *Traité de peinture*. Calmann-Lévy.

Voncken, J.H.L. (2015) *The Rare Earth Elements: An Introduction*. 1st ed. 2016 édition. Springer.

Vora, P.L. *et al.* (1997) « Image capture: synthesis of sensor responses from multispectral images », in *Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hard Copy, and Graphic Arts II. Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hard Copy, and Graphic Arts II*, SPIE, p. 2-11. Disponible sur: https://doi.org/10.1117/12.271577.

Wadum, J. (2002) « Dou doesn't paint, oh no, he juggles with his brush. Gerrit Dou a Rembrandtesque 'Fijnschilder' », in E. Hermens (éd.) *ArtMatters - Netherlans Technical Studies in Art*. Waanders Uitgevers, p. 62-77.

Walmleys, E. (2014) « Leonardo's portrait of Ginevra di Benci: a reading of the X-radiographs and infrared reflectoraphs », in *Leonardo da Vinci's technical practice, Paintings, drawings and influence.* Paris: HERMANN, p. 56-71.

Walmsley, E., Fletcher, C. et Delaney, J. (1992) « Evaluation of system performance of near-infrared imaging devices », *Studies in Conservation*, 37(2), p. 120-131. Disponible sur: https://doi.org/10.1179/sic.1992.37.2.120.

Walter, P. (2013) « Chemical Analysis and Painted Colours: the Mystery of Leonardo's Sfumato », *European Review*, 21(2), p. 175-189. Disponible sur: https://doi.org/10.1017/S1062798712000348.

Weiner, C. (1998) *Improved acquisition of underdrawings in oil-paintings using IR-reflectography*. Disponible sur: https://repository.rit.edu/theses/6750.

Wilson, M., France, F. et Bolser, C. (2018) « Multispectral Imaging for Scientific Analysis and Preservation of Cultural Heritage Materials », *Archiving Conference*, 2018, p. 147-150. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/issn.2168-3204.2018.1.0.32.

Wolfthal, D. (2006) « Renaissance Fingerprinting », in *La peinture ancienne et ses procédés: copies, répliques, pastiches : le dessin sous-jacent et la technologie dans la peinture, colloque XV, Bruges, 11-13 septembre 2003*. Leuven: Peeters.

Yokoyama, Y. *et al.* (1997) « A New Color Management System Based on Human Perception and its Application to Recording and Reproduction of Art Paintings », in *5th Color and Imaging Conference, CIC 1997, Scottsdale, Arizona, USA, November 17-20, 1997*. Society for Imaging Science and Technology, p. 169-172. Disponible sur: https://doi.org/10.2352/CIC.1997.5.1.ART00033.

Zitová, B. et Flusser, J. (2003) « Image registration methods: a survey », *Image and Vision Computing*, 21(11), p. 977-1000. Disponible sur: https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9.

# ANNEXE - Images L.A.M. de *La Joconde*

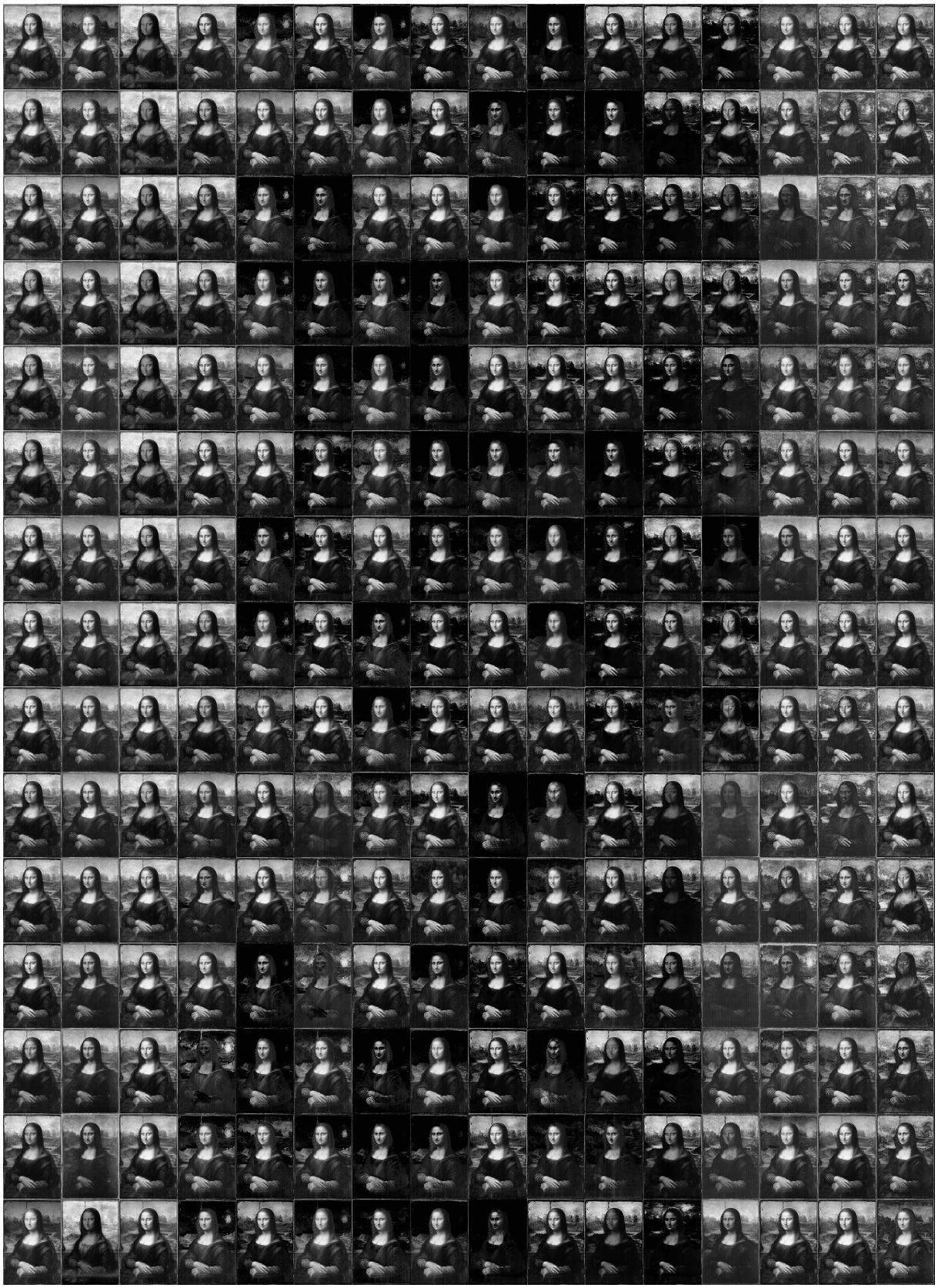


*Figure 155 - 256 images L.A.M. prises parmi les 1650 calculées*

*Figure 156 - L.A.M. # 917, calculée avec la dérivée résiduelle et les réflectances 440-480 et 520 nm*

*Figure 157 - L.A.M. # 1401, calculée avec la dérivée résiduelle et les réflectances 400-520 et 900 nm*

*Figure 158 - L.A.M. #75, calculée avec K/S, $p_{cor}$ 1.2 et les réflectances 900 et 680 nm*

# Suppléments

## Méthodes, dispositifs, calibrations, normes et cadre scientifique.

« *Science advances by instruments as much as by ideas.* »

Francis Bacon, *Novum Organum*, 1620
(« *La science progresse autant par les instruments que par les idées.* »)

# 6 SUPPLEMENTS

## 6.1 La caméra multispectrale

La conception de la caméra est spécifiquement orientée vers la numérisation d'objets plats de grand format avec des reliefs minimaux, tels que des peintures de chevalet, des plans, des livres et des dessins. Ce critère fondamental exerce une influence prépondérante sur l'ensemble des décisions techniques et scientifiques prises dans le cadre de cette recherche. Le résultat est un ensemble constitué d'un capteur CCD linéaire, d'une optique, d'un jeu de filtres interférentiels et un dispositif mécanique de mouvement du capteur et de correction de focus.

### 6.1.1 Le capteur CCD

Pour obtenir une définition optimale en photographie, il est capital de doter les caméras de capteurs possédant un nombre élevé de pixels. Néanmoins, les dimensions des matrices de pixels restent limitées. En 1996, lors de la conception de cette caméra, les matrices CCD les plus grandes disponibles n'excédaient pas 4 000 x 3 000 pixels, ce qui était insuffisant pour numériser en une seule prise et en haute définition des documents de grand format. En 2024, aucune matrice de pixels ne dépasse les 150 millions de pixels. Par conséquent, la stratégie adaptée consiste à utiliser un capteur linéaire et à assembler la matrice en déplaçant le capteur à l'intérieur de la caméra pour atteindre 240 M. pixels.

**Caractéristiques générales du capteur**

Dans cette perspective, il a été choisi d'utiliser le capteur linéaire CCD TH-7834C[22], conçu initialement pour le satellite d'imagerie SPOT 5, (Bardoux et Quicot, 2017) par la société Thomson-CSF (voir Figure 159). Ce capteur offre une sensibilité spectrale étendue, dite panchromatique, de 300 nm à 1100 nm (voir Figure 160) et possède une définition de 12 000 pixels, chaque pixel mesurant 6.5 x 6.5 µm pour une longueur totale de 78 mm. Le déplacement du capteur dans le plan focal de la caméra sur 20 000 pas permet d'atteindre une définition totale de 240 millions de pixels. Bien que la taille des pixels excède légèrement la capacité de résolution de l'optique, comme mentionné dans la section § 6.1.3, page-sup. - 9 -, cette surabondance de définition est avantageusement exploitée grâce à l'application de la technique de *binning*. (Jin et Hirakawa, 2012) et à la contribution du mode d'éclairement (voir § 4.1, page 95).

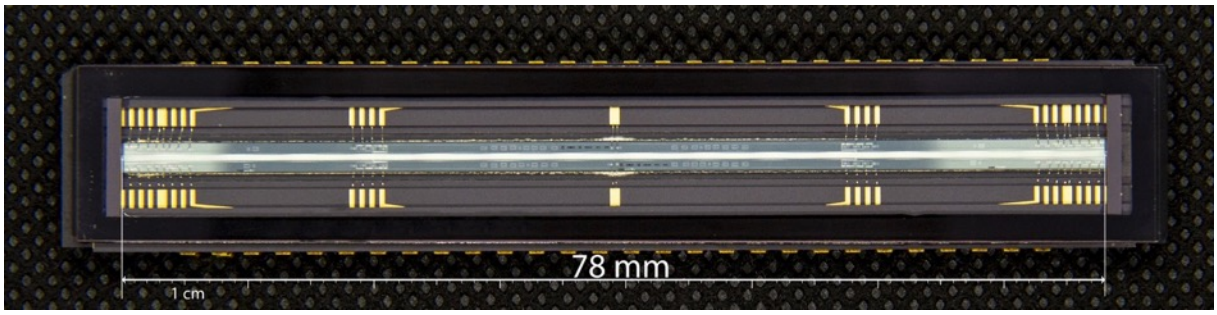



*Figure 159 - Capteur CCD linéaire Thomson-CSF TH-7834C - 12 000 pixels de 6.5 x 6.5 µm*

Le capteur CCD, à travers ses circuits électroniques, gère les phénomènes d'éblouissement, également connus sous le terme d'*anti-blooming*. Il convertit l'énergie lumineuse en électrons proportionnellement à l'intensité lumineuse incidente. Le nombre maximal d'électrons par pixel est en relation directe avec la surface de ce dernier. Typiquement, la valeur de saturation est établie à environ 10 000 électrons par micromètre carré. Dans notre cas 42.25 µm$^2$ (6.5 µm x 6.5 µm), cela équivaut à 422 500 électrons par pixel. Les électrons recueillis par le registre CCD génèrent ainsi un signal analogique de sortie.

[22] TH-7834B Datasheet: https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/054/TH7834C-pdf.php.

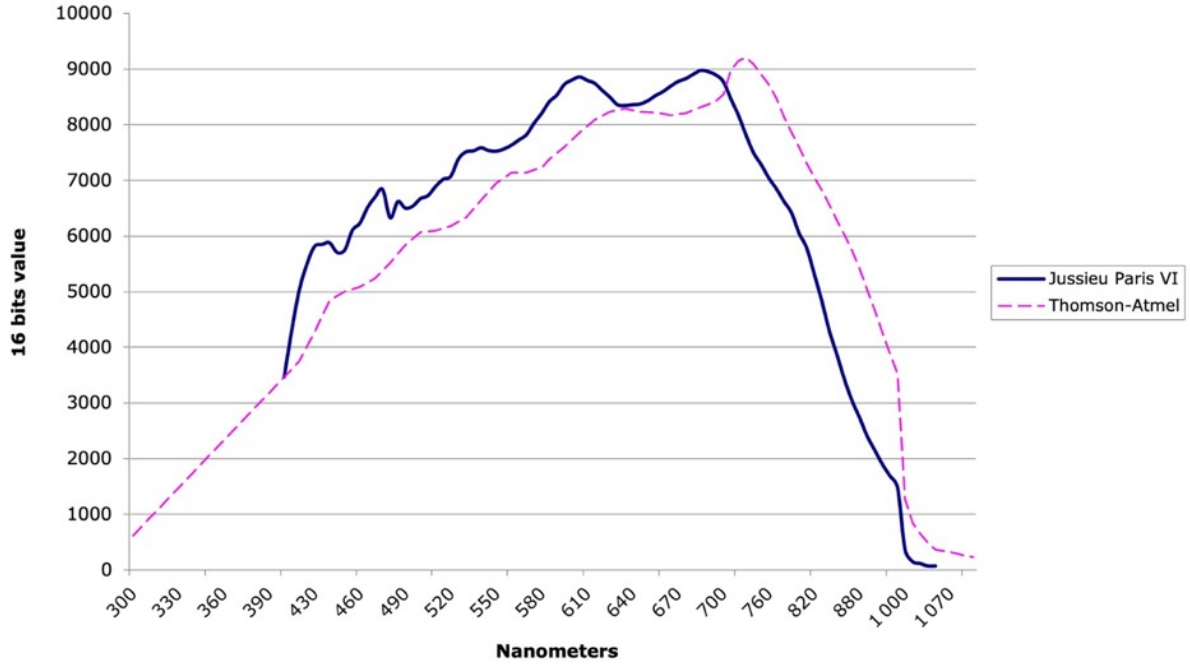



*Figure 160 - Sensibilité spectrale du CCD - 7834C - comparaison des 2 mesures.*

Avec le Laboratoire Électronique de Jussieu Paris VI la sensibilité spectrale a été vérifiée en novembre 2003 avec une sphère d'intégration et un monochromateur de 400-1050 nm. La Figure 160 montre la comparaison de ces deux mesures.

Autres caractéristiques du CCD 7834C :
VSAT Saturation output voltage = 3 V
ESAT - *Saturation exposure* = 0.6 µJ/cm$^2$
PRNU - Photo response non uniformity = 6%
VDS - Pixel average dark signal = 110 µV/ms
DCNU Dark current non uniformity = 90 µV/ms
Facteur de conversion par électron - une donnée constructeur = 6 µV/e$^-$

**Les sources de bruits du CCD**

*Shot Noise* ou bruit de grenaille

Le *shot noise* d'un capteur CCD est le bruit électronique causé par l'arrivée aléatoire de photons sur les pixels du capteur, conformément à la Loi de Poisson. Cette fluctuation résulte de la nature aléatoire des photons et de leur conversion en paires électron-trou dans la structure du pixel. Plus il y a de photons, moins le *shot noise* est perceptible, mais il devient plus fort dans des conditions de faible luminosité, pouvant affecter la qualité de l'image capturée. Il constitue la limite fondamentale de performance en termes de bruit pour les systèmes de détection de lumière.

$$P(k) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \qquad \text{Eq. ( 21 )}$$

$P(k)$ est la probabilité d'observer exactement $k$ événements.
$k$ est le nombre d'événements observés.
$\lambda$ est le nombre moyen d'événements dans l'intervalle considéré.

Dans ce contexte, les "événements" sont les photons incidents sur un pixel, et $\lambda$ est le nombre moyen de photons capturés par pixel pendant un certain intervalle de temps. Si l'on considère le nombre

moyen d'électrons produits par pixel pendant un certain intervalle de temps, cela correspond à $\lambda$ dans l'équation de la distribution de Poisson. Ainsi, $\lambda$ représente la moyenne du nombre d'électrons.

L'écart type de cette distribution de Poisson (et donc l'estimation du *shot noise*) est donné par la racine carrée de la moyenne, ce qui signifie que :

$$\sigma_{shot} = \sqrt{S} \qquad \textit{Eq. ( 22 )}$$

$\sigma_{\mathrm{shot}}$ est *shot noise* et $S$ représente le signal analogique de sortie du CCD. C'est le nombre moyen d'électrons générés en réponse aux photons capturés, correspondant à $\lambda$ dans la distribution de Poisson.

Pour un pixel saturé à 422 500 électrons ($e^-$) le *shot noise* est 650 $e^-$ mais pour un pixel qui reçoit peu de lumière avec par exemple 10 000 $e^-$ le *shot noise* sera de 100 $e^-$.

Courant d'obscurité (*Dark Current*)
Le courant d'obscurité est engendré par des défauts ou des impuretés dans le silicium ou à son interface avec l'oxyde de silicium, créant des états électroniques dans la bande interdite qui permettent aux électrons de valence de passer à la bande de conduction, augmentant ainsi le signal mesuré même en l'absence d'un signal lumineux. Il est fonction du temps d'intégration. Sa réduction est optimale par le refroidissement du CCD pour diminuer l'énergie thermique nécessaire aux électrons pour atteindre un état intermédiaire. Il induit deux types de bruit : la non-uniformité (DCNU), corrigée en soustrayant une image noire de référence à chaque image, et le *shot noise*, qui ne peut être éliminé par sa nature aléatoire. Dans le cas présent et pour un temps d'exposition de 1.3 ms le courant d'obscurité est estimé à 110 µV/ms x 1.3 ms = 143 µV que l'on peut convertir en $e^-$ avec 143 / 6 µV/$e^-$ = 23.33 $e^-$

Photo Response Non-Uniformity (PRNU)
En raison des variations inhérentes au processus de fabrication des CCD, la sensibilité à la lumière diffère entre les pixels. Ainsi, chaque pixel donnera une réponse à la lumière qui peut différer de celle de ses voisins lors du déplacement du capteur dans la caméra. Lorsque la surface numérisée est uniforme, cela se manifeste sous forme de lignes de luminosité variables. Cette variation est proportionnelle au signal moyen et représente typiquement environ un ou deux pour cent de celui-ci. Le bruit résultant de ces variations de sensibilité peut être atténué par le *flatfield*, (voir § 6.3.6, page-sup. - 39 -) un processus consistant à utiliser une image uniforme blanche préalablement capturée pour corriger les différences entre les pixels. Cette opération sera effectuée lors de l'étape de calibration.

Bruits de lecture
Le bruit de l'amplificateur de sortie, ou *Output Amplifier Noise*, est composé de deux principales sources : le bruit blanc, également appelé bruit thermique, et le bruit de scintillement, ou bruit 1/*f*.

*f* étant la fréquence de l'amplificateur. Le bruit blanc est indépendant de la fréquence et est dû à la résistance de l'amplificateur, tandis que le bruit de scintillement diminue avec l'augmentation de la fréquence. En général, le bruit blanc augmente avec la taille de l'amplificateur, tandis que le bruit de scintillement diminue.

**La dynamique**
La dynamique d'un capteur, conjointement avec son rapport signal sur bruit (SNR pour *Signal to Noise Ratio*), est essentielle dans plusieurs aspects de la capture d'images et de la mesure.

La qualité des images dépend directement de la dynamique du capteur. Un SNR élevé permet de réduire le bruit, préservant ainsi les détails fins et assurant une reproduction fidèle des niveaux de luminosité, ce qui contribue à une meilleure qualité visuelle.

Dans une image le rendu des zones très sombres en basse lumière, et des zones saturées en hautes lumières est influencé par la dynamique du capteur. Un SNR élevé permet de capturer un large éventail de niveaux de luminosité, préservant les détails dans les ombres sans surexposer les hautes lumières.

Le SNR est calculé selon la relation suivante :

$$SNR_{dB} = 20 \cdot log_{10}\left(\frac{a_{max} - a_{min}}{\sqrt{N_{shot}^2 + N_{dark}^2 + R^2}}\right) dB \qquad \textit{Eq. ( 23 )}$$

$SNR_{dB}$ est le rapport signal sur bruit en décibels,
$a_{max}$ est le niveau de signal maximal capturé par le capteur,
$a_{min}$ est le niveau de signal minimal capturé par le capteur,
$a_{max} - a_{min}$ représente la plage de dynamique du CCD, c'est-à-dire l'amplitude totale du signal.
$N_{shot}$ est le *shot noise*, qui est proportionnel à la racine carrée du nombre de photons détectés,
$N_{dark}$ est le bruit de fond, causé par les électrons libérés dans les pixels en l'absence de lumière incidente,
$R$ est le bruit de lecture, associé au bruit électronique de l'amplificateur de sortie.

Cette équation fournit une mesure du rapport signal sur bruit exprimée en décibels, tenant compte à la fois du niveau de signal et des différents types de bruit associés à la capture et à la lecture des données par un capteur CCD

L'utilisation du logarithme en base 10 multiplié par 20 ($20 \cdot log_{10}$) est typique pour exprimer des ratios de puissance en décibels (dB).

Suivant les spécifications techniques du CCD TH-7834C (voir note 22 page-sup - 2 -) et pour une température d'utilisation normale à 20°C le rapport signal sur bruit (SNR) est de 10 000 :1 soit l'équivalent d'une plage dynamique (DR pour *Dynamique Range*) de 80 dB calculé par 20 x $Log_{10}$(10 000), ou 13.3 bits calculé par $Log_{10}$(10 000) / $Log_{10}$(2). En situation réelle de la chaine électronique jusqu'au convertisseur A/D à 28°C on mesure un SNR de 9 230 :1 pour un temps d'exposition de 1.3 ms, ou l'équivalent DR de 79.3 dB ou 13.2 bits. Par comparaison, le rapport SNR d'une caméra hyperspectrale est donné pour 400 : 1 (Delaney, Dooley, et al., 2017, p.9).

**Binning**
La dynamique peut être augmentée par la méthode du *binning*. Elle est généralement effectuée sur le capteur en combinant les sorties des photosites voisins, ou par des algorithmes mathématiques. Cela réduit la définition mais augmente la DR et le SNR en réduisant le bruit de fond. Cependant, la réduction excessive de la définition avec le *binning* entraîne également une perte d'information ; il existe donc un compromis entre un gain en dynamique et une perte de résolution spatiale. Un *binning* par algorithme de 4x4 pixels au maximum est utilisé pour améliorer la dynamique des images de +10dB pour atteindre près de 90 dB pour les opérations de traitements numériques des images que l'on réserve uniquement pour l'extraction d'informations (voir § 3.1, page 65).

**L'amplification et la conversion analogique/numérique**

Les signaux analogiques du capteur passent par un étage d'amplification pour ajuster les niveaux puis sont numérisés par un convertisseur Analogique/Digital, avec un temps d'intégration minimum de 1.3 ms. Les pixels paires et impaires sont traités séparément dans deux chipsets VSP2212[23].

L'ajustement de l'amplification du signal est effectué en considération des conditions d'éclairage, des filtres, de la sensibilité spectrale du capteur ainsi que des configurations spécifiques de l'installation de la caméra (voir Tableau 12). Dans le dessein d'assurer une dynamique maximale des mesures, il est préférable de minimiser l'usage de l'amplification et d'augmenter les temps d'exposition, avec un maximum de 200 ms. En effet, cela permet de préserver l'intégrité et la fidélité des données enregistrées, en réduisant les distorsions potentielles induites par une amplification excessive du signal.

| Gain | en dB | facteur |
|---|---|---|
| 128 | 0,00 | 1,00 |
| 140 | 0,56 | 1,07 |
| 150 | 1,03 | 1,13 |
| 160 | 1,50 | 1,19 |
| 170 | 1,97 | 1,25 |
| 180 | 2,44 | 1,32 |
| 190 | 2,91 | 1,40 |
| 200 | 3,38 | 1,48 |
| 210 | 3,85 | 1,56 |
| 220 | 4,32 | 1,64 |
| 230 | 4,79 | 1,74 |
| 240 | 5,26 | 1,83 |
| 250 | 5,73 | 1,93 |
| 260 | 6,19 | 2,04 |
| 270 | 6,66 | 2,15 |
| 280 | 7,13 | 2,27 |
| 290 | 7,60 | 2,40 |
| 300 | 8,07 | 2,53 |
| 310 | 8,54 | 2,67 |
| 320 | 9,01 | 2,82 |
| 330 | 9,48 | 2,98 |
| 340 | 9,95 | 3,14 |
| 350 | 10,42 | 3,32 |
| 360 | 10,89 | 3,50 |
| 370 | 11,36 | 3,70 |
| 380 | 11,83 | 3,90 |
| 390 | 12,29 | 4,12 |
| 400 | 12,76 | 4,35 |
| 410 | 13,23 | 4,59 |
| 420 | 13,70 | 4,84 |
| 430 | 14,17 | 5,11 |
| 440 | 14,64 | 5,40 |
| 450 | 15,11 | 5,70 |

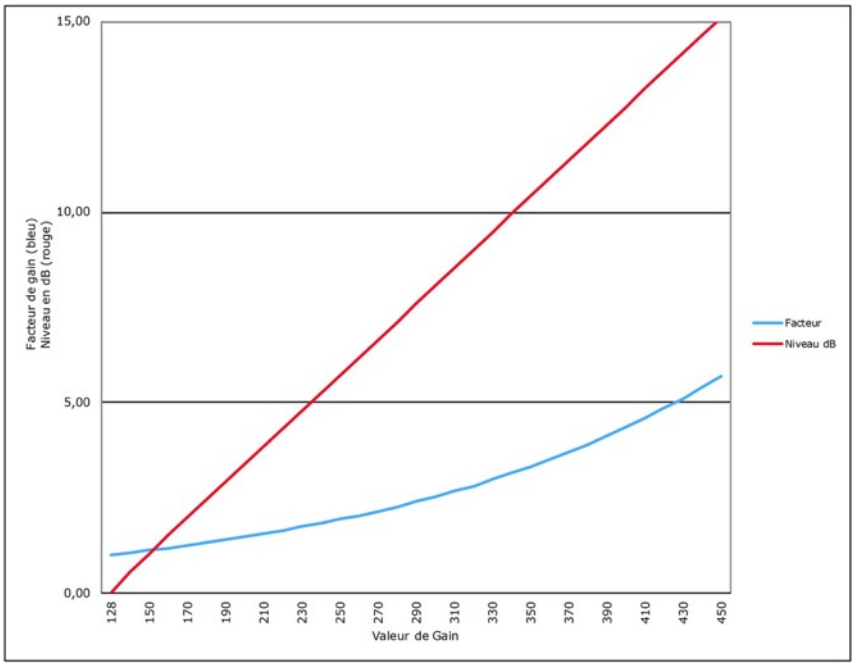



*Tableau 12 - Niveaux de gains ajustables - courbe du facteur d'amplification et du niveau en dB*

L'analyse du tableau et du graphique des niveaux de gains ajustables révèle une relation exponentielle entre le niveau de gain de l'amplificateur Burr Brown $G_{Burr}$, l'amplification en décibels $G_{dB}$, et le facteur de gain. La relation entre $G_{Burr}$ et $G_{dB}$ est défini par :

$$G_{dB} = \frac{42}{1023 - 128} \times (G_{Burr} - 128) \qquad \textit{Eq. ( 24 )}$$

Les données montrent que l'augmentation du niveau de gain entraîne une croissance logarithmique de l'amplification. On constate que l'amplification est pratiquement linéaire en dB, et qu'en augmentant le gain par pas de 6 dB on mesure une amplification multipliée par 2 à chaque pas.

[23] BurrBrown Datasheet:
https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Texas%20Instruments%20PDFs/VSP2212_Rev_Nov_2016.pdf

**La réponse linéaire du CCD**

La mesure de la linéarité de la réponse de l'instrument est essentielle, constituant le fondement de son fonctionnement et de sa fiabilité. La qualité des images et des données obtenues dépend en grande partie de cette caractéristique. Une série de tests a été effectuée pour évaluer la linéarité de la réponse du CCD qui, en accord avec les principes quantiques, a été confirmée.

Une cible de référence en téflon blanc a été placée devant la caméra avec l'éclairage habituellement utilisé, des paramètres constants, sans utiliser de filtre (panchromatique) et avec un gain à 0 dB (sans amplification). Les mesures ont été réalisées en faisant varier le temps d'exposition dans la plage normale d'utilisation de la caméra de 2,5 ms à 60 ms. La moyenne des images obtenues a ensuite été calculée et reportée sur le graphique (voir Figure 161). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 0.00275.

Des études complémentaires ont également évalué cette linéarité sous amplification du signal. (Bardoux et Quicot, 2017) (Ribés Cortés, 2003)(p.145)

La réponse du CCD avec un filtre interférentiel *hard-coating* (voir § 6.1.4 page-sup. - 16 -) donne un résultat avec un meilleur RMSE de 0.00195.

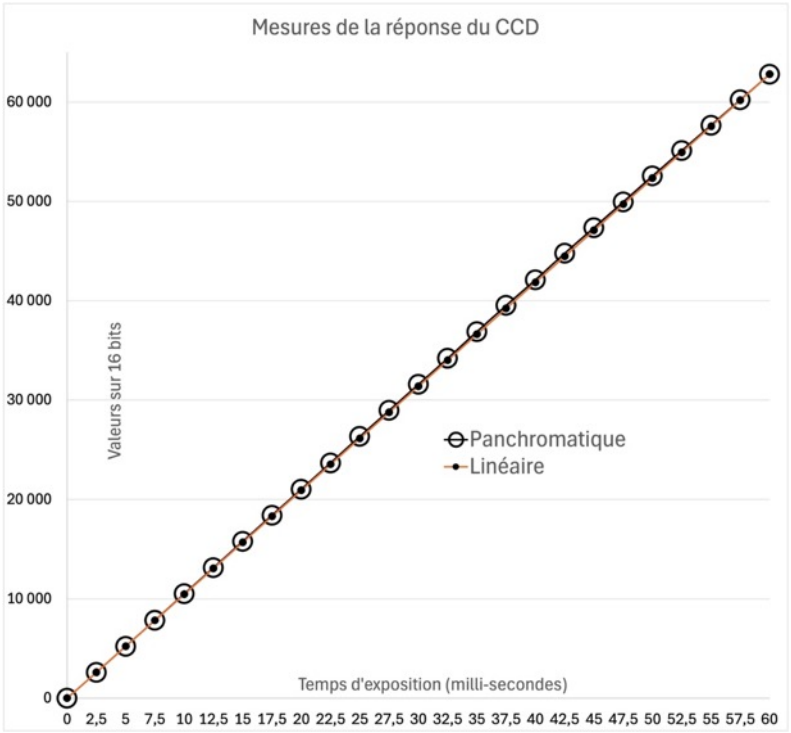



*Figure 161 - Les valeurs médianes, fonction du temps d'exposition (cercles) suivent une droite (points noirs)*

## 6.1.2 L'optique, une distorsion géométrique minimum

Le choix de l'optique joue un rôle central dans la conception d'une caméra, car elle fait partie de la chaîne d'éléments garantissant la qualité de l'image et la précision des mesures de réflexion de la lumière. En plus des critères de mesures traditionnelles telles que la Modulation Transfert Fonction (MTF), la Contraste Transfert Fonction (CTF) et la Point Spread Fonction (PSF), il est nécessaire de prêter attention à la distorsion géométrique, car cette caractéristique permet une superposition précise de toutes les images multispectrales. Cette distorsion doit être minimale et linéaire du centre

optique au bord de l'image. Pour ce faire, une approche simple a été choisie en utilisant un ensemble à lentilles symétriques (voir Figure 162). Cette décision découle d'une volonté de privilégier une méthode directe et épurée dans notre approche en rejetant par exemples les optiques apochromatiques par exemple qui n'offrent pas la précision géométrique nécessaire. En adoptant cette conception, l'objectif est de simplifier le processus tout en préservant une efficacité optique optimale, notamment en termes de MTF et CTF.

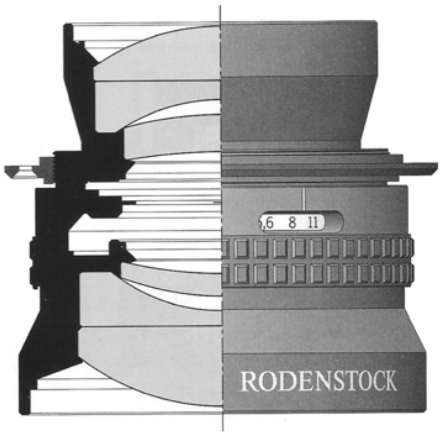



*Figure 162 - Coupe de l'optique Rodagon 1:5.6 f=210 mm 6 éléments (3+3)*

Une des caractéristiques optiques et mécaniques essentielle de cette caméra réside dans sa capacité à enregistrer une mise au point spécifique pour chaque filtre, présentant ainsi deux avantages distincts, maintenir une CTF maximale pour chaque longueur d'onde et éliminer les aberrations chromatiques sagittales et longitudinales, dont la présence serait inévitable autrement. Cette capacité représente un avantage technique significatif par rapport aux caméras hyperspectrales, car la mise au point, et par extension la résolution, sont optimisées pour une longueur d'onde spécifique, et sont notablement moins performantes aux extrémités du spectre. À titre de comparaison, les mesures effectuées pour les filtres à 400, 760 et 1000 nm, tout en maintenant la mise au point sur la bande centrale à 560 nm, révèlent des CTF faibles (voir Tableau 14 page-sup - 11 -).

**Un focus spécifique pour chaque filtre**

La caméra génère 13 images distinctes, une pour chaque filtre utilisé, et chacune de ces images présente des dimensions différentes en raison des focales individuelles appliquées lors de la mise au point (voir Figure 163). En conséquence, les images ne partagent pas la même échelle de grandissement.

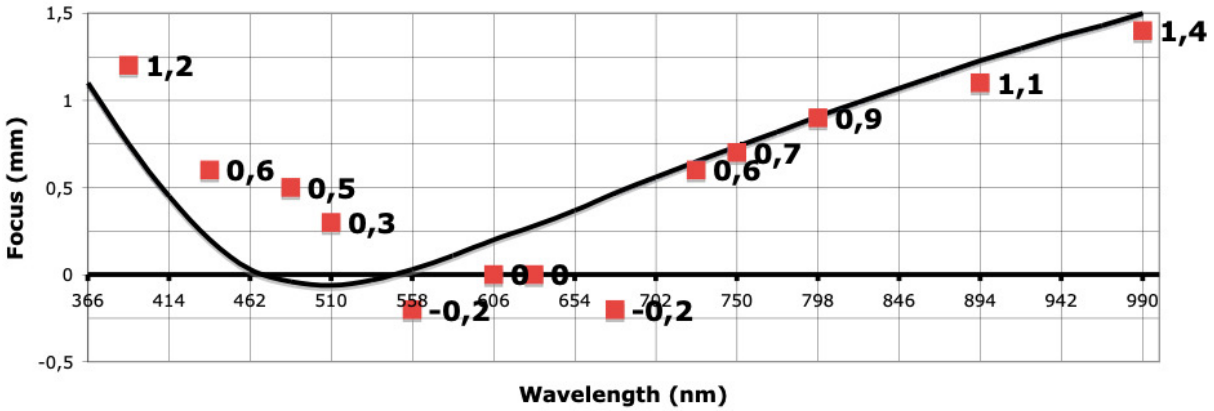



*Figure 163 - Variations du focus en fonction de la longueur d'onde.*
*Les carrés rouges représentent les points de focus des filtres, en fonction de leur épaisseur, par rapport au filtre de référence à 560 nm. La courbe noire trace la variation "intrinsèque" du focus de l'optique en l'absence de filtre. Les mesures sont effectuées à une distance de 185 cm entre la caméra et le plan de numérisation, avec une résolution de 500 dpi.*

Les images obtenues dans les domaines ultraviolet et infrarouge tendent à être plus grandes que celles capturées dans le domaine visible. Pour remédier à cette disparité, un logiciel de traitement est utilisé pour redimensionner (réduire) les images UV et infrarouges, en alignant leur taille sur celle de l'image capturée avec le filtre 560 nm, qui est la plus petite des 13 images produites.

Il est impératif d'effectuer une superposition précise de toutes les images acquises au moyen des différents filtres optiques, y compris celles obtenues par imagerie infrarouge. Cette superposition ne peut être garantie que si les distorsions géométriques sont réduites au minimum, voire entièrement absentes et se caractérisent par une linéarité dans leur comportement. Cette exigence de minimalité des distorsions est d'autant plus nécessaire que le logiciel de recalage (*registration*) opère selon un principe de redimensionnement linéaire (voir § 6.4.3, page-sup - 43 -). Contrairement à certains logiciels de recalage élastique multipoints, souvent basés sur des *b-Splines* (Rueckert et al., 1999), le logiciel linéaire n'introduit quasiment aucun bruit ni perte d'information (Zitová et Flusser, 2003). En effet, les méthodes de recalage élastique sont nécessaires pour compenser les distorsions géométriques significatives introduites par l'optique ; toutefois, dans le cas de notre étude, où la distorsion géométrique est minime, voire inexistante et linéaire, l'utilisation d'un logiciel de recalage par redimensionnement linéaire se révèle non seulement adéquate mais aussi supérieure en termes de préservation de la qualité et de l'intégrité des données images.

Choisir un système de mise au point spécifique pour chaque filtre présente plusieurs avantages. Après avoir expérimenté avec des filtres d'épaisseurs variables, nous avons constaté que cette approche ne permettait pas d'obtenir une netteté optimale pour chaque longueur d'onde, rendant obligatoire une mise au point individualisée pour chaque filtre. Cette solution permet de tirer pleinement parti des optiques et des 240 000 000 pixels. Elle offre également une grande flexibilité, rendant la caméra adaptable à différentes configurations, y compris la macrophotographie, où une mise au point précise est essentielle (comme illustré à la Figure 163).

Comparée à l'utilisation de filtres d'épaisseurs variables, cette approche améliore considérablement les performances de la caméra tout en maintenant sa polyvalence.

### 6.1.3 Le pouvoir séparateur

La résolution d'un système optique est intrinsèquement liée aux limites de diffraction de la lumière, une notion fondamentale en optique.

Les limites de la diffraction de la lumière sont définies par la tâche d'Airy, elle représente la réponse idéale d'un système optique à un point lumineux ponctuel, et elle établit une limite théorique à la capacité de séparation des détails dans une image. Fondamentalement, la diffraction de la lumière impose des contraintes à la capacité d'un système optique à résoudre les détails fins, limitant ainsi sa résolution effective.

Pour un diaphragme circulaire, le diamètre de la tâche d'Airy peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Tache\ d'Airy = 2.44\ \frac{\lambda}{D} \qquad \textit{Eq. ( 25 )}$$

où $\lambda$ est la longueur d'onde de la lumière utilisée (en mètres) et $D$ est le diamètre de l'ouverture de l'objectif (en mètres)

La longueur d'onde de la lumière visible se situe généralement autour de 560 nm (vert).
Le diamètre de l'ouverture $D$ peut être calculé à partir de l'ouverture numérique $N$:

$$D = \frac{f}{N} \qquad \textit{Eq. ( 26 )}$$

avec $f$ la focale de l'objectif. Substituons les valeurs données par les valeurs de l'optique de la caméra et son ouverture d'utilisation : $f$= 210 mm, avec $N$=5.6

$$D = \frac{0.21}{5.6} = 0.0375\ m \qquad \textit{Eq. ( 27 )}$$

Maintenant, on peut calculer la taille de la tâche d'Airy :

$$Tâche\ d'Airy = 2.44\frac{560 \cdot 10^{-9}}{0.0375} \approx 36\ \mu m \qquad \textit{Eq. ( 28 )}$$

Dans une optique de focale 210 mm et une ouverture de N =5.6, le diamètre de la tâche d'Airy est estimé à 0.036 mm (36 µm), ce qui correspond à environ 27 lignes/mm. En pratique, le pic central porte environ 80% de la lumière, les 20% restants étant distribués dans les anneaux de diffraction.

Cette limite théorique a conduit à la définition de plusieurs critères de résolution (voir Figure 164) :

**Le critère de Schuster**, nommé d'après Sir Arthur Schuster, qui analyse la visibilité des franges d'interférence et insiste sur la netteté et le contraste des figures de diffraction pour juger la séparation de deux sources.

**Le critère de Rayleigh**, établi par Lord Rayleigh au 19ème siècle, selon lequel deux sources ponctuelles sont considérées résolues si le maximum de l'une coïncide avec le premier minimum de l'autre.

**Le critère de Sparrow**, plus exigeant, qui repose sur le contraste entre pics et vallées de diffraction, et conduit à un pouvoir séparateur supérieur à celui de Rayleigh. (Malacara-Hernández, 2013)

**Le critère de Houston**, formulé au XX$^{e}$ siècle (Houston, 1927), propose une approche encore plus pragmatique : il définit la résolution comme la fréquence spatiale maximale pour laquelle le contraste (ou "modulation") d'une mire périodique reste perceptible au-delà d'un seuil fixé (généralement 3 % de modulation dans la fonction de transfert de modulation, MTF). Ce critère est particulièrement adapté à l'évaluation des performances effectives d'un système d'imagerie, car il intègre les effets conjoints de la diffraction, de l'aberration et du traitement du signal.

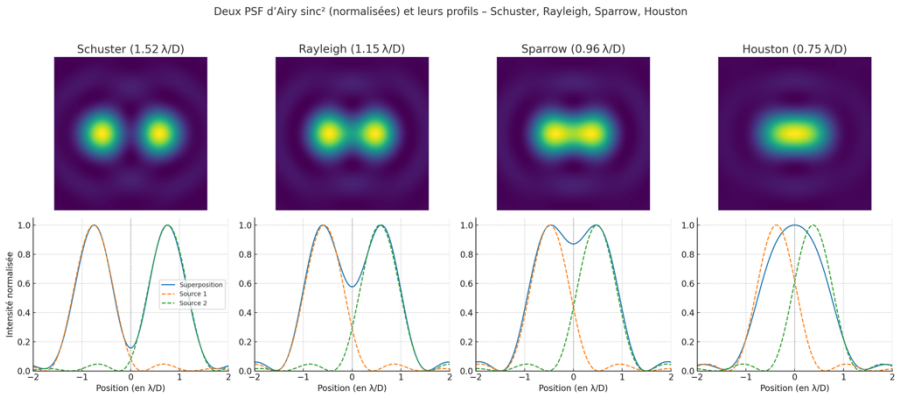



*Figure 164 - 4 critères d'évaluation de la résolution*

*Superposition de deux PSF d'Airy sinc² séparées selon les critères classiques de résolution (Schuster, Rayleigh, Sparrow, Houston). Chaque PSF individuelle est normalisée, et la courbe de superposition est renormalisée à un maximum unitaire pour permettre une comparaison visuelle directe. La séparation spatiale est exprimée en unités normalisées λ/D.*

Selon le critère de Rayleigh, le pouvoir séparateur de l'optique considérée atteint ≈ 55 l/mm à 560 nm, tandis que le critère de Sparrow (≈ 0,84 × Rayleigh) le porte à ≈ 65 l/mm. Le critère de Houston, (≈ 0,70 × Rayleigh) quant à lui, introduit une notion plus réaliste de résolution pratique, en retenant la

fréquence spatiale à laquelle la MTF de la chaîne d'imagerie (au minimum l'optique, et le cas échéant capteur, échantillonnage, affichage) atteint un seuil de visibilité d'environ 3 %. Dans le cadre du présent tableau, où l'on évalue le sous-système optique seul, Houston conduit à ≈ 78 l/mm à 560 nm, soit une séparation plus fine que celles déduites de Rayleigh et de Sparrow (voir Tableau 13).

| nm | Ø Airy µm | P/mm | Ø Rayleigh µm | P/mm | Ø Sparrow µm | P/mm | Ø Houston µm | P/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 400 | 26,0 | 38 | 13 | 77 | 11 | 91 | 9 | 110 |
| 440 | 28,6 | 35 | 14 | 70 | 12 | 83 | 12 | 83 |
| 480 | 31,2 | 32 | 16 | 64 | 13 | 76 | 11 | 91 |
| 520 | 33,8 | 30 | 17 | 59 | 14 | 70 | 12 | 84 |
| **560** | **36,4** | **27** | **18** | **55** | **15** | **65** | **13** | **78** |
| 600 | 39,0 | 26 | 20 | 51 | 16 | 61 | 14 | 73 |
| 640 | 41,6 | 24 | 21 | 48 | 17 | 57 | 15 | 69 |
| 680 | 44,2 | 23 | 22 | 45 | 19 | 54 | 15 | 65 |
| 720 | 46,8 | 21 | 23 | 43 | 20 | 51 | 16 | 61 |
| 760 | 49,5 | 20 | 25 | 40 | 21 | 48 | 17 | 58 |
| 800 | 52,1 | 19 | 26 | 38 | 22 | 46 | 18 | 55 |
| 900 | 58,6 | 17 | 29 | 34 | 25 | 41 | 20 | 49 |
| 1 000 | 65,1 | 15 | 33 | 31 | 27 | 37 | 23 | 44 |

*Tableau 13 - Calculs de résolution théorique pixels/mm d'une focale de 210 mm à ouverture N=5.6*
*Diamètres de la tâche d'Airy, critère de Rayleigh, critère de Sparrow, critère de Houston*

Il sera observé que la contribution du mode d'éclairement (voir § 4.3 page 101) permet de réduire la diffraction et d'améliorer ainsi la résolution optique de la caméra.

**Mesures de la C.T.F.**

Dans le contexte de ces mesures, ne pas confondre la *Modulation Transfert Fonction* (MTF) avec la *Contraste Transfert Fonction* (CTF). Tandis que la MTF quantifie la fidélité avec laquelle un système optique reproduit les détails de l'image en fonction des fréquences spatiales, la CTF mesure spécifiquement la capacité d'une caméra à reproduire ces fréquences spatiales, c'est-à-dire les détails d'une image. Les tests ont été réalisés en utilisant le motif de test ISO 16097-1 (Strausbaugh et Gann, 2002), qui inclut des paires de lignes noires et blanches à diverses fréquences (voir Figure 165). Avec un réglage de la caméra à 1200 dpi, un pixel de 6.5 µm du CCD capte une zone de 21 µm sur le motif de test. La CTF est calculée pratiquement en évaluant le contraste des lignes du motif à différentes fréquences spatiales de la cible. La fréquence spatiale minimale $f_0$ est capturée sur des zones lumineuses étendues aux bords de la cible.

Des tests effectués avec cette caméra démontrent les capacités performantes du système (voir Tableau 14).

| **C(*f*) on raw files** | | Variable focus for 13 Filters from 400 nm to 1000 nm and Panchro without filter | | | | | | | | | | | | | | Fixed Focus 560 nm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cycles/mm | size | 400 | 440 | 480 | 520 | 560 | 600 | 640 | 680 | 720 | 760 | 800 | 900 | 1000 | Panchro | 400 | 760 | 1000 |
| $f_0$ | | *77%* | *83%* | *84%* | *83%* | *79%* | *83%* | *83%* | *80%* | *81%* | *81%* | *84%* | *72%* | *53%* | *92%* | *43%* | *67%* | *24%* |
| 6 c/mm | 83 µm | 61% | 65% | 64% | 61% | 65% | 64% | 66% | 62% | 59% | 59% | 58% | 43% | 42% | 54% | 6% | 13% | 3% |
| 8 c/mm | 63 µm | 52% | 60% | 52% | 50% | 52% | 53% | 54% | 51% | 48% | 49% | 47% | 35% | 30% | 39% | 6% | 11% | 2% |
| 12 c/mm | 42 µm | 31% | 35% | 35% | 28% | 32% | 37% | 37% | 37% | 29% | 32% | 29% | 22% | 17% | 23% | 5% | 2% | 2% |
| 24 c/mm | 21 µm | 8% | 10% | 12% | 6% | 5% | 11% | 10% | 13% | 10% | 10% | 8% | 5% | 10% | 8% | 2% | 2% | 2% |
| Focus adjust. (210 mm ∞) | | 278.60 | 278.20 | 278.00 | 278.00 | **277.90** | 278.20 | 278.30 | 278.50 | 278.70 | 278.90 | 279.20 | 279.80 | 280.30 | 275.80 | **277.90** | **277.90** | **277.90** |

*Tableau 14 - Mesures de la CTF à N=8 pour tous les filtres avec un focus spécifique individuellement. Les CTF des filtres 400, 760, et 1000 nm sont aussi donnés avec un focus identique au filtre 560 nm à 277.90 mm.*

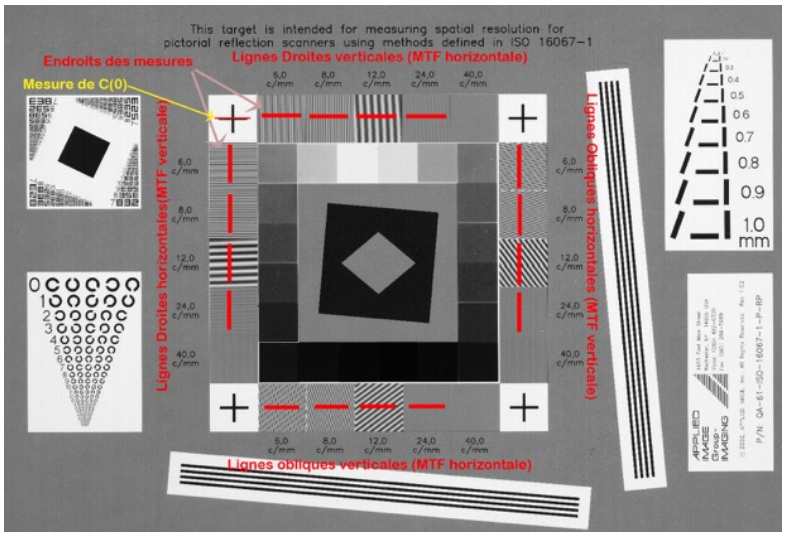



*Figure 165 - Mire ISO 16067-1*
*Mesure de la résolution spatiale. Les traits rouges indiquent les emplacements des mesures.*

Il est possible d'améliorer légèrement la CTF grâce à des algorithmes de traitement logiciel tels que les matrices de déconvolution. Cependant, cette amélioration s'accompagne d'une baisse significative de la dynamique de l'image (DR et SNR) et n'est pas utilisée pour l'analyse L.A.M. de l'imagerie multispectrale. On verra que pour la numérisation de tableaux le mode d'éclairement améliore plus efficacement la CTF (voir § 4.3 page 101).

**La perte relative en luminosité**

La perte relative en luminosité sur les bords des images est inévitable à toute optique. Elle est aussi appelée « vignettage » en tant que phénomène optique (voir Figure 166). Elle peut être décrit mathématiquement pour quantifier l'atténuation de la lumière sur les bords d'une image. La formule de base pour calculer l'intensité lumineuse $I$ sur un certain point de l'image, en tenant compte du vignettage, peut s'exprimer comme suit :

$$I(\theta) = I_0 cos^n(\theta) \qquad \textit{Eq. ( 29 )}$$

avec :

- $I(\theta)$ l'intensité lumineuse à un angle $\theta$ par rapport à l'axe central de l'optique. Cet angle n'est pas le même que l'angle auquel le rayon lumineux entre dans l'objectif, mais l'angle auquel il frappe le capteur.

- $I_0$ l'intensité lumineuse du centre de l'image.

- $\cos^n(\theta)$ le cosinus de l'angle d'incidence des rayons lumineux par rapport à l'axe optique avec $n$ un facteur qui dépend de la conception de l'optique et qui décrit la sévérité du vignettage. Plus $n$ est élevée, plus le vignettage est fort.

Pour l'optique Rodagon 210 mm de la caméra multispectrale $n$ = 4.

Cette formule fournit une base pour analyser ce phénomène qui sera corrigé numériquement sur les images finales grâce au *flatfield* vu au § 6.3.6, page-sup. - 39 -.

*Figure 166 - Exemple de filtre à poser à l'entrée de l'optique pour une correction de perte en luminosité avec n=4*

**La transmittance**

La transmittance des optiques varie en fonction de la longueur d'onde, c'est principalement dû aux traitements de surface appliqués aux lentilles. Ces traitements sont essentiels pour optimiser les performances des systèmes optiques, mais ils introduisent des effets secondaires comme des variations de transmittance à travers le spectre de la lumière.

Les revêtements optiques sont conçus dans le dessein d'améliorer les performances des systèmes optiques en réduisant la réflexion de la lumière, un phénomène susceptible d'engendrer des images parasites et des éblouissements, tout en favorisant la transmission accrue de la lumière à travers les éléments optiques. Ils sont constitués de multiples couches de matériaux diélectriques, caractérisées par des indices de réfraction variables. Chaque couche est soigneusement conçue pour induire une interférence constructive ou destructive avec la lumière à différentes longueurs d'onde, ce qui aboutit à une amélioration de la transmission pour certaines longueurs d'onde tout en minimisant les réflexions indésirables.

Les revêtements sont spécifiquement optimisés pour maximiser la transmittance dans le domaine visible du spectre lumineux, bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces dans les bandes ultraviolettes (UV) et infrarouges (IR). Dans la section § 6.3.6, page-sup. - 39 -, la solution du *flatfield* sera examinée pour tenir compte de cette limitation.

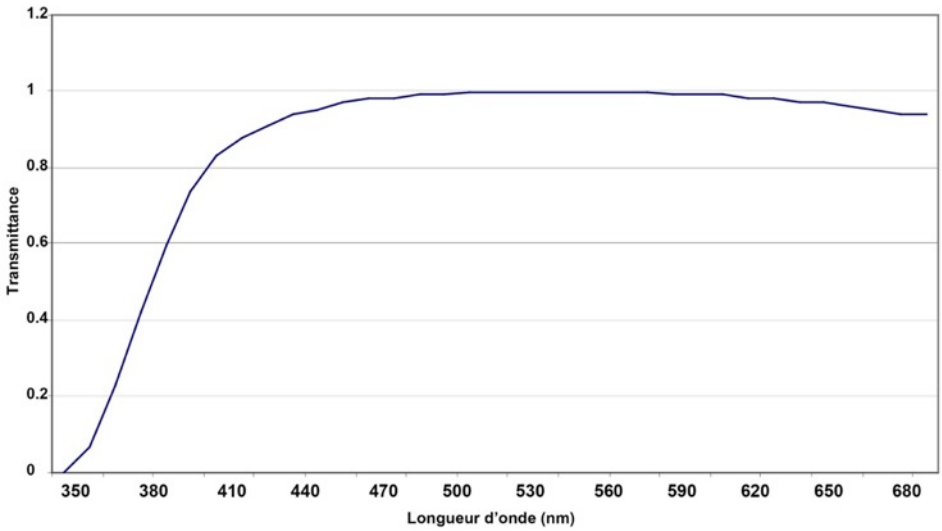



*Figure 167 - Transmittance de l'optique Rodagon 210 mm*

### 6.1.4 Les filtres

À l'intérieur de la caméra, situé sur le trajet optique entre l'objectif et le CCD, réside un mécanisme à barillet doté de 14 emplacements destinés à être positionnés devant le capteur CCD linéaire (voir Figure 168). Un de ces emplacements est dédié à une position neutre sans filtre. La configuration de la caméra comprend un ensemble de 13 filtres distincts. 10 filtres présentent une bande passante de 40 nm dans le spectre visible de 380 à 780 nm, ainsi que 3 filtres avec une bande passante de 100 nm dans le domaine proche infrarouge de 750 à 1100 nm (voir Figure 170). Le choix de dix filtres équidistants dans le visible s'appuie sur les travaux de (Maître et al., 1996), qui ont montré qu'un tel échantillonnage permettait de reconstruire fidèlement les spectres des pigments et d'assurer une reproduction colorimétrique fiable, et (Vora et al., 1997) ont démontré qu'il n'était pas nécessaire d'en utiliser davantage.

Dans le spectre visible, le but est de couvrir la plage de longueurs d'onde avec une précision maximale en utilisant des filtres passe-bandes d'une étroitesse optimale. Cependant, il faut maintenir une certaine marge pour éviter des temps d'exposition excessifs avec des filtres de bandes passantes plus étroites ou la nécessité d'amplifier excessivement le signal. En outre, une attention particulière est accordée à la sélectivité des bandes et à la minimisation des recouvrements entre celles-ci.

*Figure 168 - Barillet à 13 filtres + filtre neutre.*

Pour ce qui est du domaine infrarouge, où la sensibilité du capteur est réduite, il est nécessaire d'adopter des filtres de bande passante plus larges. Ce choix découle de la nécessité d'optimiser la détection des longueurs d'onde dans cette plage spécifique tout en tenant compte des limitations inhérentes à la sensibilité du capteur. Il sera nécessaire de prendre en compte le choix des filtres pour le dispositif d'éclairage et son spectre d'émission.

Le programme de recherche Européen CRISATEL a mené des études complémentaires sur l'optimisation du jeu de filtres. Cette étude est l'un des sujets abordés dans la thèse d'A. Ribés Cortés de l'E.N.S.T. en 2003. Sa conclusion présentée à la page 194 de sa thèse confirme la validité du choix des 13 bandes passantes adoptées dès l'origine de la conception en 1999, fondées sur des filtres par absorption (*soft-coating*). (Ribés Cortés, 2003) (p.194)

| **Filtres :** | | **400** | **440** | **480** | **520** | **560** | **600** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Epaisseur (mm) : | | 6.48 | 5.32 | 5.3 | 5.05 | 3.75 | 4.11 |
| Tirage (mm) : | 229.8 | 232.4 | 231.8 | 231.7 | 231.5 | 231 | 231.2 |
| **Filtres :** | **640** | **680** | **720** | **760** | **800** | **900** | **1000** |
| Epaisseur (mm) : | 3.8 | 2.58 | 4.5 | 4.59 | 4.8 | 4.45 | 4.58 |
| Tirage (mm) : | 231.2 | 231 | 231.8 | 231.9 | 232.1 | 232.3 | 232.6 |

*Tableau 15 - Epaisseur des filtres* Soft-coating *1ère génération, exemple de tirage optique.*

**Optimisation du jeu de filtres en 2021**

Les avancées techniques ont conduit en 2021 à l'adoption de filtres interférentiels plus sélectifs et performants en termes de dynamique, de densité optique et de réjection hors bande. Ces nouveaux filtres utilisent une technologie de *hard-coating*, une évolution significative par rapport aux filtres de *soft-coating* conçus en 1999. Initialement, ces filtres de première génération présentaient des épaisseurs variables pour minimiser les différences de mise au point entre eux, comme documenté dans le Tableau 15. Mais pour atteindre la résolution extrême de la caméra les épaisseurs variables n'évitent pas une correction du tirage optique, une modification a été apportée en 2005 pour des filtres à épaisseur constante de 7 mm, toujours en *soft-coating* (voir Figure 171).

En 1999, les filtres choisis avaient un recouvrement significatif entre eux, comme indiqué dans le Tableau 16. Plusieurs filtres captaient les mêmes longueurs d'onde à leurs intersections. Cependant, dans le contexte d'une caméra multispectrale, l'élimination de ce recouvrement présente l'avantage d'une isolation spectrale optimale sans interférence avec les autres filtres. Cette isolation est essentielle pour l'identification précise des caractéristiques spectrales, surtout dans des applications nécessitant une grande précision.

**Filtres par absorption *soft-coating de 1999 à 2021***

Les filtres par absorption *soft-coating* reposent sur l'absorption sélective de certaines longueurs d'onde de la lumière par des matériaux multicouches, comme le sulfure de zinc, la cryolithe, et parfois l'argent, placés entre des couches diélectriques transparentes (voir Figure 169). Ces matériaux absorbent spécifiquement la lumière à certaines longueurs d'onde, permettant de moduler la transmission de la lumière à travers le filtre. Ce ne sont pas des filtres fonctionnant par interférence lumineuse.

Les composants des filtres par absorption *soft-coating* sont laminés en strates pour offrir une protection contre l'environnement. En raison des matériaux et du processus de fabrication, les *soft-coating* sont fragiles. Le matériau de revêtement est souvent retiré des bords du filtre pour éviter la dégradation due à l'humidité et augmenter la durée de vie, qui est généralement de 2 à 5 ans.

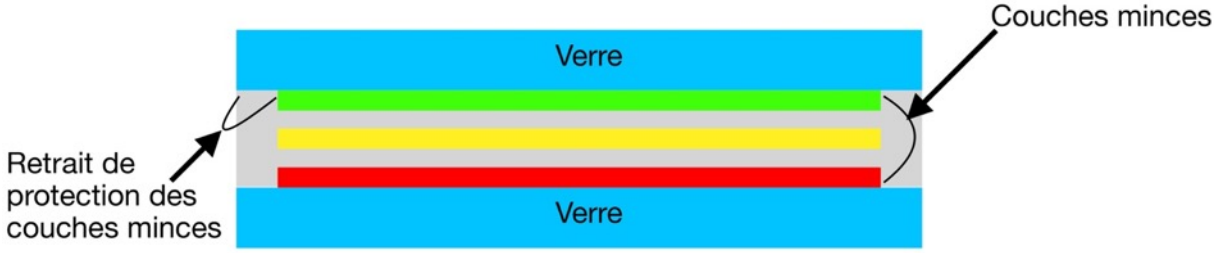



*Figure 169 - Schéma d'assemblage d'un filtre* soft-coating.

**Transmittance dans les filtres *soft-coating***

Les équations régissant le fonctionnement des filtres *soft-coating* incluent la loi de Beer-Lambert-Bouguer, du scientifique Pierre Bouguer (1729) , étendue par Johann Heinrich Lambert, et enrichie par Johann Joachim Beer (Simonot, 2021). Cette loi décrit la relation entre la transmittance d'une substance, la concentration de la substance, l'épaisseur du matériau traversé et le coefficient de transmission du matériau, ainsi que d'autres équations spécifiques liées à la conception et aux propriétés optiques des matériaux utilisés dans les couches transmettant la lumière.

Les équations exactes peuvent varier en fonction de la conception spécifique du filtre, mais voici une description générale du processus de transmission dans un *soft-coating* :

La loi de Beer-Lambert-Bouguer. Pour *un soft-coating*, cette loi peut être exprimée comme suit :

$$t(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda)h} \qquad \textit{Eq. ( 30 )}$$

Avec :

- $t(\lambda)$ : la transmittance du matériau à la longueur d'onde $\lambda$,
- $\alpha(\lambda)$ : le coefficient d'absorption linéaire à la longueur d'onde $\lambda$, (souvent noté $\mu_a$ ou $\alpha$)
- $h$ : l'épaisseur du matériau traversé.

Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ est une mesure de la capacité d'un matériau à absorber la lumière à une certaine longueur d'onde. Il est généralement calculé à partir des propriétés optiques du matériau.

La façon dont les couches transmettant la lumière sont déposées et leur structure jouent un rôle dans le processus de transmission. Les techniques de dépôt (comme l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, etc.) et la conception de la structure des couches optimisent les performances de transmission.

Il convient de noter que la conception d'un *soft-coating* implique un savoir-faire industriel.

**Filtres interférentiels (*hard-coating*)**

Les filtres interférentiels *hard-coating,* exploitent les interférences optiques pour contrôler sélectivement la réflexion et la transmission de la lumière à différentes longueurs d'ondes. Ils fonctionnent en utilisant la différence de phase entre les réflexions des interfaces entre différentes couches diélectriques. Les couches réfléchissantes sont conçues pour réfléchir sélectivement certaines longueurs d'onde de la lumière tout en laissant passer d'autres ce qui est illustré par les transmittances des filtres dans le graphique (voir Figure 171).

Ces filtres sont développés à l'aide d'un processus de dépôt par plasma qui permet un empilement uniforme des couches, une grande adaptabilité environnementale et des performances supérieures aux filtres *soft-coating*. Non seulement la transmittance d'un *hard-coating* est plus cohérente en fonction de la longueur d'onde, mais elle est également généralement supérieure à celle d'un *soft-coating*.

Ils sont couramment utilisés dans les applications nécessitant une haute réflectivité à des longueurs d'onde spécifiques, comme les miroirs dans les lasers et les systèmes optiques de précision.

Leur fonctionnement est principalement régi par ces 3 équations :

1. Différence de phase pour une onde réfléchie :

Lorsqu'une onde lumineuse est réfléchie à une interface entre deux milieux d'indice de réfraction différent, il se produit un déphasage entre le rayon réfléchi sur la première interface et le rayon réfléchi sur la deuxième interface. Ce déphasage peut être augmenté de $\pi$ si le milieu sous la deuxième interface a un indice de réfraction plus faible que celui de la couche considérée (Hecht, 2020). L'équation générale pour le déphasage entre les deux premiers rayons réfléchis sur une couche mince est donnée par :

$$\Delta\phi = 2\pi\frac{2d}{\lambda}n\,cos(\theta) \qquad \textit{Eq. ( 31 )}$$

Avec $\Delta\phi$ le changement de phase, $d$ l'épaisseur de la couche, $\lambda$ est la longueur d'onde de la lumière, $n$ l'indice de réfraction du matériau et $\theta$ l'angle de propagation.

2. Condition d'interférence constructive :

L'interférence constructive se produit lorsque les ondes réfléchies des différentes interfaces interfèrent de manière constructive. Pour que cela se produise, la différence de phase entre les ondes

réfléchies doit être un multiple pair de $\pi$, soit $2m\pi$. La condition d'interférence constructive est généralement exprimée comme :

$$2nd\,cos(\theta) = m\lambda \qquad \textit{Eq. ( 32 )}$$

Avec *m* un entier (1, 2, 3, ...) correspondant à l'ordre de l'interférence.

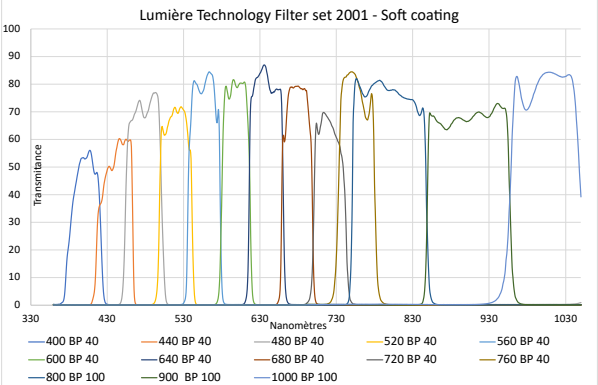
3. Condition d'interférence destructive :

L'interférence destructive se produit lorsque les ondes réfléchies interfèrent de manière destructrice. Pour cela, la différence de phase entre les ondes réfléchies doit être un multiple impair de $\pi$ soit $(2m + 1)\pi$. La condition d'interférence destructive est généralement exprimée comme :

$$2nd\,cos(\theta) = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \qquad \textit{Eq. ( 33 )}$$

Avec $m$ un entier (0, 1, 2, ...) correspondant à l'ordre de l'interférence.

En combinant ces équations avec les propriétés optiques des matériaux utilisés dans le *hard-coating* et en prenant en compte les conditions d'incidence de la lumière, il est possible de concevoir des structures de couches qui produisent des interférences optiques souhaitées pour des applications spécifiques, telles que la réflexion sélective ou la transmission dans certaines gammes de longueurs d'onde.



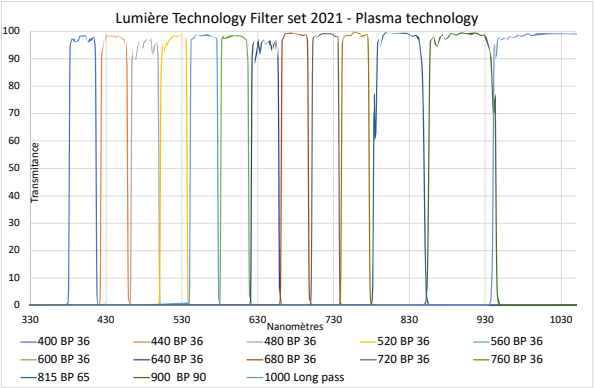




*Figure 170 - Bandes passantes des 13 filtres* - soft coating - *épais. 7 mm utilisés de 2001 à 2021 (←)*
*Figure 171 - Bandes passantes des 13 filtres* - hard coating - *épais. 2 mm depuis 2021 (→)*

**Nouveaux filtres, nouvelles performances**

Le Tableau 16 présente les caractéristiques des deux technologies de filtres. Leurs divergences tiennent en 3 points : Bande-passante et recouvrement, transmittance et densité optique.

**Bandes-passantes et recouvrement**

Les bandes-passantes des filtres *hard-coating* ont été réduites à 36 nm et sont espacées de 40 nm pour éviter tout recouvrement entre filtres voisins. Le filtre de 800 nm a été restreint à 65 nm pour éliminer le recouvrement avec le filtre de 760 nm, tandis que le filtre de 900 nm a été réduit à 90 nm. Quant au filtre de 1000 nm, il est configuré en tant que *long-pass* (il laisse passer tout ce qui est supérieur à 950 nm) afin de tirer pleinement parti de la sensibilité du capteur CCD jusqu'à 1100 nm. Un filtre *short-pass* (ou *cut-off*) est un filtre optique qui laisse passer les longueurs d'onde jusqu'à un certain point et bloque celles au-delà. Le filtre de 400 nm est de type passe-bande plutôt que *short-pass* en raison de la sensibilité du CCD aux ultraviolets et du fait que certains types d'éclairage, comme les lampes au xénon, émettent une quantité significative d'UV. Ceci aurait pu avoir un impact sur la reconstruction des spectres et les calculs colorimétriques. Les bénéfices inhérents à cette nouvelle configuration se résument comme suit :

Une amélioration notable de l'élimination des recouvrements entre filtres dans leur ensemble et plus particulièrement pour les filtres 760, 800, 900 et 1000 nm entraîne une augmentation d'environ 14.3% (14.7%-0.4%) des informations disponibles, avec une meilleure capacité de discrimination.

**Comparaison filtres *Soft-coating* de 2001 et *Hard-coating* de 2021**

| CWL | 400 | 440 | 480 | 520 | 560 | 600 | 640 | 680 | 720 | 760 | 800 | 900 | 1000 | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bande passante (nm)** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles - *Soft-coating* | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 100 | 100 | 100 | |
| Alluxa - *Hard-coating* | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 65 | 90 | Long Pass | |
| **Recouvrements (filtre X recouvre X+1 ; overlaps) > 0,2** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles % - *Soft-coating* | 14,8% | 15,0% | 13,8% | 14,6% | 8,7% | 11,0% | 12,0% | 10,3% | 27,9% | 29,4% | 5,1% | 13,5% | | **14,7%** |
| Alluxa % - *Hard-coating* | 0,00% | 0,00% | 0,55% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,01% | 0,00% | 0,11% | 0,00% | 0,50% | 4,13% | | **0,4%** |
| **Max Transmittance** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles - *Soft-coating* | 56,0% | 60,3% | 76,9% | 71,8% | 84,5% | 81,6% | 87,0% | 79,3% | 69,7% | 84,5% | 82,0% | 73,0% | 84,4% | 76,2% |
| Alluxa - *Hard-coating* | 98,4% | 98,6% | 97,6% | 98,9% | 98,8% | 98,6% | 97,7% | 99,5% | 99,3% | 99,8% | 99,5% | 99,5% | 99,2% | 98,9% |
| **Power (surface spectrale)** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles - *Soft-coating* | 4106 | 4875 | 6755 | 5714 | 6523 | 5779 | 7173 | 5965 | 5313 | 7587 | 14943 | 14800 | 14682 | |
| Alluxa - *Hard-coating* | 6882 | 6824 | 6869 | 6793 | 7144 | 7144 | 6842 | 7061 | 7047 | 7184 | 12762 | 17060 | 21624 | |
| Alluxa % + rapide | 67,6% | 40,0% | 1,7% | 18,9% | 9,5% | 23,6% | -4,6% | 18,4% | 32,6% | -5,3% | -14,6% | 15,3% | 47,3% | **19,3%** |
| **Densité Optique (OD) sans pic** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles <0,02 - *Soft-coating* | 1,5 | 2,2 | 2,1 | 2,3 | 2,0 | 2,0 | 2,2 | 2,2 | 2,6 | 2,4 | 2,4 | 2,1 | 2,9 | **2,2** |
| Alluxa <0,002 - *Hard-coating* | 3,5 | 3,2 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,2 | 3,4 | 3,4 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,3 | 3,4 | **3,4** |
| **Densité Optique (OD) avec pic** | | | | | | | | | | | | | | |
| Melles - *Soft-coating* | 1,8 | 1,5 | 1,1 | 1,9 | 1,5 | 1,8 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 1,4 | 0,8 | **1,6** |
| Alluxa - *Hard-coating* | 2,5 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 2,6 | 2,3 | 2,8 | 2,4 | 2,8 | 3,0 | **2,7** |

*Tableau 16 - Comparaisons des caractéristiques et des performances optiques et physiques des filtres de 2001 en* Soft-coating *et de 2021 en* Hard-coating.

**Transmittance**

La transmittance des filtres *hard-coating* est meilleure pour deux motifs : premièrement, elle avoisine les 99 %, et deuxièmement, cette performance est uniforme sur l'ensemble de la bande-passante, contrairement aux *soft-coating* qui présentent un pic de transmittance plus restreint.

Les bénéfices de cette amélioration de la transmittance sont multiples :

- Le capteur CCD bénéficie d'une augmentation de 19.3 % de l'énergie lumineuse reçue, ce qui contribue à améliorer la dynamique des images et permet de réduire la nécessité d'amplification ou d'avoir une vitesse de numérisation plus rapide de 19.3%.

- L'amélioration la plus remarquable est pour les filtres 400 nm et 440 nm, avec respectivement +67.6% et +40 % de transmittance. Cette amélioration autorise l'utilisation de sources lumineuses faibles émettant dans le spectre bleu, telles que les lampes halogènes, par exemple.

**Densité Optique**

La densité optique (OD) d'un filtre est une mesure de son efficacité à atténuer ou bloquer la transmission de la lumière en dehors de sa bande passante. Elle est définie comme :

$$OD = -log_{10}(T) \qquad \textit{Eq. ( 34 )}$$

Avec $T$ la transmittance du filtre à la longueur d'onde spécifique.

Les filtres avec une densité optique plus élevée sont souvent préférés dans les applications où une suppression efficace de certaines longueurs d'onde est nécessaire. On mesure la densité optique avec pics ou sans pic en dehors de la bande passante. Voir exemple de transmittance en dehors de la bande passante Figure 172. Des mesures ont été réalisées deux ans après la date de fabrication. Les filtres *soft-coating* sont donnés pour une OD 4.0, les mesures donnent en situation réelle une OD 2.2 de 380 nm à 1050 nm sans pic montrant une dégradation des performances. Les filtres *hard-coating* sont donnés pour une OD 4.0, les mesures donnent en situation réelle une OD 3.4 de 300 nm à 1100 nm sans pic. Avec les filtres *hard-coating* la dynamique des images est augmentée de 54% environ (3.4/2.2).

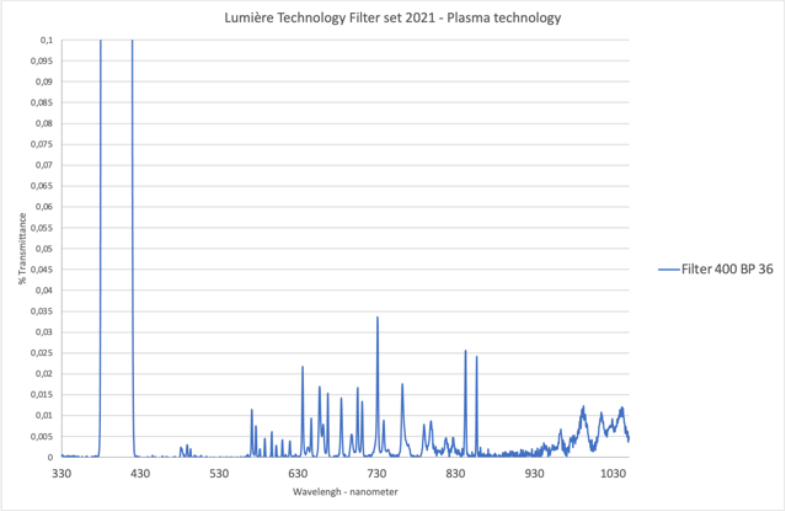



*Figure 172 - Transmittance du filtre 400 nm B.P. 36* hard-*coating sur une échelle de 0.1 %.*
*En dehors de la bande passante (380-416 nm), les niveaux moyens de transmission restent inférieurs à 0,005%, démontrant l'efficacité du filtre à réduire la lumière non désirée.*

La densité optique influence directement la dynamique d'une image de plusieurs manières.

• Contraste : En bloquant les longueurs d'onde de lumière en dehors de la bande passante, les filtres à haute densité optique améliorent l'image en réduisant les influences indésirables de la lumière parasite, ce qui conduit à des images plus nettes et mieux définies.

• Réduction du bruit : En atténuant la lumière parasite ou indésirable, les filtres à haute densité optique contribuent à réduire le bruit dans l'image, en particulier dans les zones sombres où le rapport signal/bruit est généralement plus faible. Cela améliore la qualité de l'image en réduisant les artefacts indésirables.

Les autres bénéfices des filtres *hard-coating* sont :
• Une épaisseur de filtre de 2 mm, contre 7 mm des filtres *soft-coating*, réduisant les reflets sur les bords des filtres.
• Un traitement antireflet sur la deuxième face sur les filtres *hard-coating* les rendent plus efficaces. (BBAR side 2 for CWL)
• Une longue durée de vie, contrairement aux filtres *soft-coating* d'une durée de vie de 2 à 5 ans.

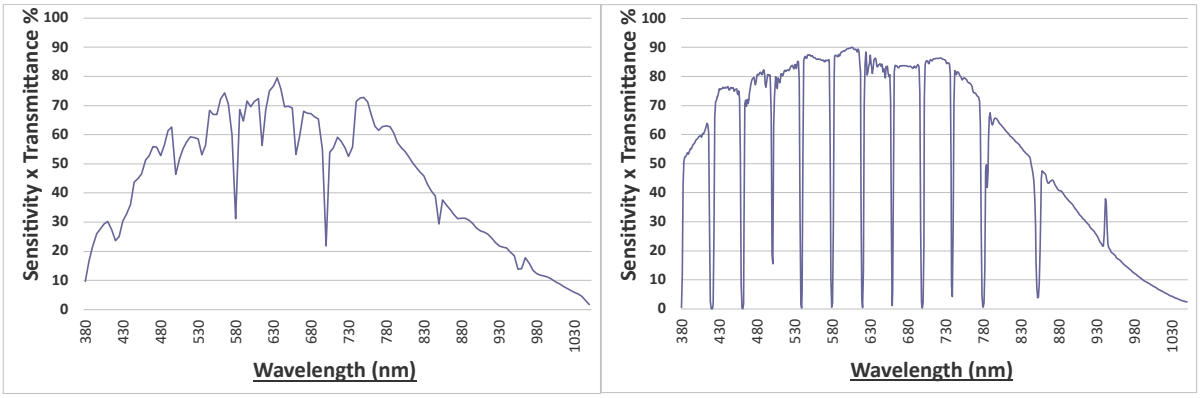



*Figure 173 - Efficacité quantique (Q.E.) x transmittance des filtres première génération* - Soft coating *(←)*
*Figure 174 - Efficacité quantique (Q.E.) x transmittance des filtres deuxième génération* - Hard coating *(→)*

**Comparaison des deux technologies de filtres**

Les deux graphiques Figure 173 et Figure 174 représentent l'efficacité quantique (QE) du même CCD, multipliée par les bandes passantes des jeux de filtres *soft-coating* et *hard-coating*. En résumé, les filtres *hard-coating* offrent une transmittance plus élevée et plus régulière, maximisant la performance du CCD et offrant une meilleure séparation des bandes passantes comparé au jeu de filtres *soft-coating*.

**Sensibilité angulaire des filtres**

Lorsque la lumière atteint un filtre avec un angle d'incidence $\theta$ non normal (par rapport à la surface du filtre), les chemins optiques à travers les différentes couches du filtre varient. Ce qui entraine des changements dans les propriétés de transmission spectrale du filtre et qui affecte directement la bande-passante et sa transmittance.

La sensibilité angulaire C.H.A. (*Cone Half Angle*) des filtres joue directement sur la précision des mesures optiques dans la caméra.

Elle peut être estimée pour des petits angles $\theta$, et l'équation permet de décrire le décalage de la longueur d'onde transmise par le filtre en raison de l'angle d'incidence $\theta$ donné par :

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n \cos\theta} \qquad \textit{Eq. ( 35 )}$$

$\lambda'$ est la longueur d'onde transmise par le filtre à l'angle d'incidence $\theta$
$\lambda$ est la longueur d'onde normale de pic de transmission (à incidence normale, $\theta = 0°$),
$n$ est l'indice de réfraction du milieu du filtre,
$\theta$ est l'angle, exprimé en radians, entre le rayon lumineux entrant et la perpendiculaire à la surface du filtre. Lorsque cet angle augmente, la longueur d'onde transmise change en raison du changement de trajectoire du rayon lumineux à travers le filtre.

Pour des petits angles (inférieurs à 15°), $cos\theta$ peut-être approximé par $1 - \frac{\theta^2}{2}$ grâce au développement de Taylor autour de 0. Cette approximation simplifie l'analyse tout en restant assez précise pour de petits angles.

Pour la perte en transmittance, $t_i(\lambda)$ peut être estimée aussi pour des petits angles $\theta$ <15° avec :

$$t_{i,\theta}(\lambda) = t_{i,\theta=0°}\left(\lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_E}{n^*} \cdot sin(\theta)\right)^2}\right) \qquad \textit{Eq. ( 36 )}$$

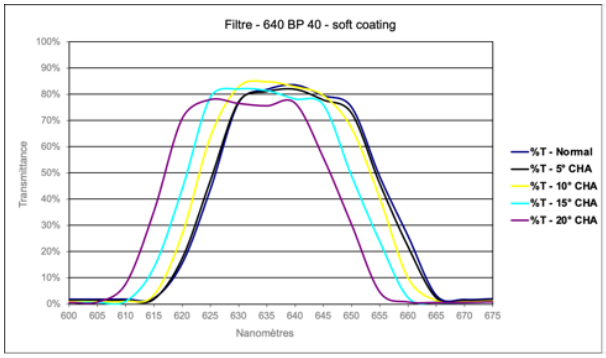
Où $n_E$ est l'indice de réfraction du milieu externe (l'air) et $n^*$ est une moyenne de l'indice de réfraction effectif du filtre.

En résumé, bien que les équations pour estimer le décalage de spectre et la perte en transmittance offrent des approximations utiles pour comprendre l'impact de l'angle d'incidence sur les performances des filtres interférentiels, leur applicabilité peut varier sensiblement entre les filtres *hard-coating* et *soft-coating*.

Pour les filtres *hard-coating*, les équations tendent à être plus précises et fiables en raison de la densité et de l'uniformité accrues des couches déposées.

Cependant, pour les filtres *soft-coating*, la nature moins uniforme des couches peut rendre ces équations moins fiables et doivent être appliquées avec prudence.

Dans ce contexte, pour obtenir une compréhension précise des performances sous différents angles d'incidence, des mesures expérimentales s'avèrent nécessaires. Ces mesures sont présentées ci-après.



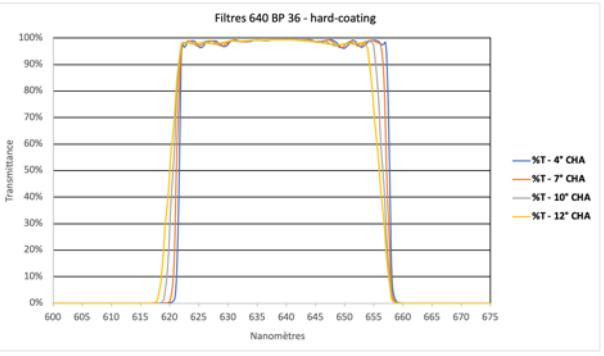




*Figure 175 - Mesures goniométriques C.H.A. en transmittance du filtre 640 nm BP 40* soft-coating *(←)*
*Figure 176 - Mesures goniométriques C.H.A. en transmittance du filtre 640 nm BP 36* hard-coating. *(→)*

• ***Soft-coating***
Des mesures goniométriques des filtres *soft-coating* montrent pour un angle de 20° un décalage de plus de 10 nm la bande-passante - se décale vers le bleu - et la transmittance baisse de plus de 10%. Pour un angle de 5° ce décalage est négligeable.

Dans le contexte de la caméra, la question de l'angle d'incidence se manifeste principalement dans le plan horizontal plutôt que vertical. Aux extrémités du CCD, l'angle d'incidence atteint un maximum de 9 degrés, ce qui ne pose pas de problème lors de la numérisation spécifique de peintures de chevalet, les deux extrémités du CCD, tant en haut qu'en bas, sont systématiquement utilisées pour capturer des repères visuels. Dans le sens de déplacement du CCD, le problème devient plus critique car l'angle d'incidence aux deux extrémités atteint 17.2 degrés (voir Figure 175). La manière dont l'ingénierie mécanique a résolu cette question sera explorée ci-après, garantissant que le filtre reste toujours perpendiculaire à l'incidence de la lumière, indépendamment de la position du CCD.

• ***Hard-coating***
Les filtres *hard-coating* se distinguent par leur capacité à maintenir une stabilité remarquable face à la divergence angulaire du système optique, tant en termes de stabilité de la bande-passante que de la transmission et de la réjection hors de la bande (densité optique) (voir Figure 176).

• **Dernière analyse**
Le principal avantage des filtres *soft-coating* réside dans leur coût de fabrication unitaire plus abordable. En effet, la production de filtres *hard-coating* nécessite des volumes significatifs pour amortir leurs coûts de fabrication.

On verra au § 6.3.4, page-sup. - 36 - le comparatif expérimental des deux technologies de filtres et comment les filtres *hard-coating* contribuent à améliorer les qualités techniques de la caméra multispectrale.

### 6.1.5 La mécanique

La conception mécanique de la caméra a été étudiée afin d'intégrer toutes les fonctions nécessaires dans un espace restreint. Une des principales contraintes réside, bien entendu, dans la nécessité d'assurer l'étanchéité à la lumière extérieure et de minimiser les réflexions internes de la lumière provenant de l'optique. Ces exigences ont réclamé de nombreuses adaptations. La caméra est équipée de six moteurs, le premier étant dédié au mouvement du capteur. Les autres moteurs incluent celui du panier à filtres, celui du déplacement de l'optique, celui du déplacement de l'ensemble de la caméra, ainsi que deux moteurs destinés à contrôler deux porte-filtres additionnels positionnés juste après la sortie de l'optique. Filtres prévus pour la phase de réglages ou de futures applications. Toutes ces motorisations réclament précision et un contrôle numérique pour un pilotage par ordinateur.

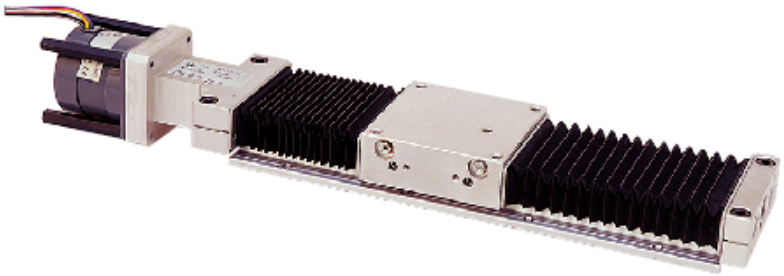


*Figure 177 - Banc micro-métrique Alme Star*

**Le banc micrométrique**

Le déplacement du capteur CCD est réalisé par un système composé d'un chariot sur lequel est monté le capteur CCD, celui-ci se déplaçant via une vis à billes de grade supérieur de précision 2 µm, dans un système de guidage. (Alme STAR ref. SOK 12.85/ PSK 50-Vis 300mm) (voir Figure 177). Le capteur CCD est fixé sur une carte électronique qui assure les fonctions fondamentales telles que la gestion des signaux de synchronisation, l'alimentation stabilisée à double étages, ainsi que l'amplification, la conversion analogique/digitale et la gestion du bus de transport des datas.

**La motorisation du CCD**

La vis à billes est actionnée par un moteur pas à pas (Socitec FD8L 602-1100-21) contrôlé par une électronique OEM 750. Le chariot avance de 2.5 mm pour chaque tour de vis avec 50 800 micro-pas par tour assurant une précision plus que nécessaire de 49 nm (2.5 mm / 50 800) et qui est à la base du succès pour la numérisation des Cadastres français et américains.

Les moteurs pas-à-pas, tout comme la majorité des moteurs, présentent des fréquences de résonance, ce qui signifie que la fréquence des pas entre en résonance avec l'ensemble du système moteur, générant ainsi une vibration globale. Ces vibrations se propagent aux composants auxquels le moteur est connecté. Dans le cas de la caméra et donc de l'ensemble du système de numérisation (comprenant le banc micrométrique et le capteur CCD), ces vibrations perturbent considérablement toute tentative de numérisation. Des systèmes d'accouplement entre l'axe du moteur et la vis à billes sont mis en place pour atténuer la transmission des vibrations sans les éliminer complètement. Par conséquent, l'utilisation de la caméra pour des temps d'exposition proches de la fréquence de résonance est inenvisageable. La fréquence de résonance du moteur à la première harmonique est de 0,8858 tours par seconde. Cela signifie que les temps d'exposition de 2,9 millisecondes, avec une marge d'erreur de ±0,3 millisecondes, doivent être évités. Ce résultat est basé sur le calcul suivant : 6,5 µm (longueur d'onde) / 2,5 mm (distance de déplacement) / 0,8858 (fréquence de résonance).

**La mécanique du barillet à filtres et son système de correction**

Le dispositif mécanique à barillet comporte 14 emplacements destinés à être positionnés devant le capteur CCD, dont un est réservé pour une position sans filtre, comme illustré sur la Figure 168 page-sup. - 14 -. Un mécanisme à biellette permet d'assurer l'ensemble de la cinématique du barillet à l'aide d'un seul moteur, permettant ainsi à chaque filtre d'être précisément positionné devant le capteur. Monté sur un axe mobile, l'orientation du filtre placé devant le capteur demeure constamment normale à la lumière (au centre optique), garantissant ainsi l'absence de toute dérive spectrale. Une barre de métal assure cette correction mécanique en reliant le support du barillet sous l'axe du centre optique (voir Figure 178).

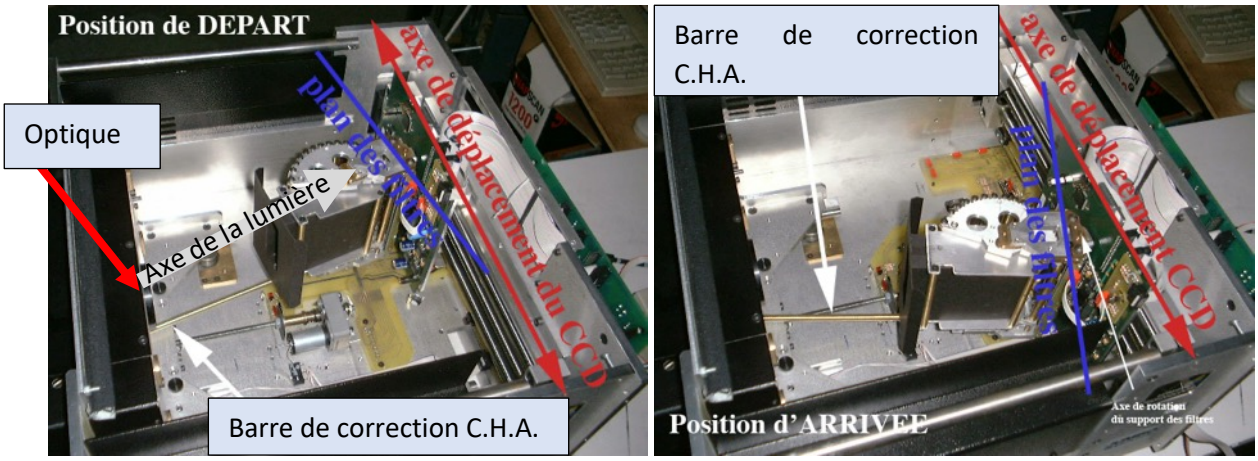



*Figure 178 - Vue intérieure du prototype de la caméra - barillet à filtres en position devant le capteur CCD relié au centre optique par une barre.*

**La motorisation de l'optique**

Comme exposé au § 6.1.2 page-sup. - 8 -, l'ajustement individuel de la mise au point pour chaque filtre garantit une C.T.F. maximum quelle que soit la configuration. Un moteur asservi, contrôlé par une roue codeuse et un capteur optique, assure un positionnement précis avec une précision de 0.04 mm, ce qui dépasse largement les exigences nécessaires en matière de précision.

**La motorisation de l'ensemble de la caméra**

Les réglages précis du focus pour chaque filtre provoquent des changements dans les échelles des images obtenues. Afin de corriger ces variations individuellement, un système de positionnement de l'ensemble de la caméra a été installé sous celle-ci, permettant de rapprocher ou d'éloigner la caméra. Cependant, ce dispositif s'est avéré être trop imprécis pour assurer une régistration (recalage) parfaite des images au pixel près, et a donc été abandonné au profit d'une solution logicielle.

*Figure 179 - Le socle de la caméra en position avancée (←) et en position de recul (→)*

**Les porte-filtres additionnels**

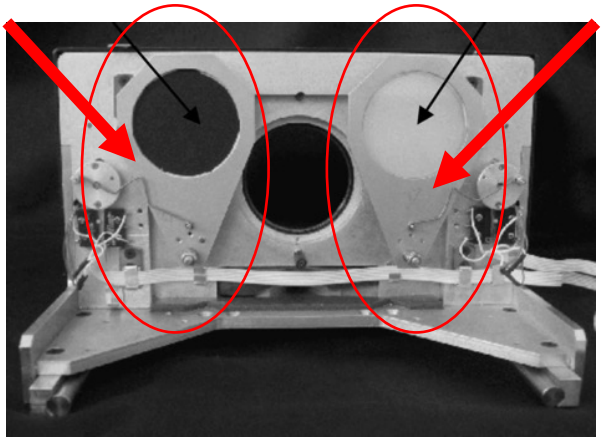


*Figure 180 - Deux porte-filtres additionnels peuvent être positionnés derrière l'optique - ici configurés avec une occlusion et un diffuseur.*

À l'origine conçus pour la phase de calibrage et positionnés à l'intérieur de la caméra et derrière l'optique, deux porte-filtres supplémentaires étaient équipés d'une occlusion et d'un diffuseur dans le but de mémoriser le D.S.N.U. (correction de l'uniformité du noir) et le P.R.N.U. (Uniformité de la réponse des pixels). Cependant, cette fonction a été éliminée et remplacée par une procédure de calibrage plus exhaustive qui intègre les corrections de l'optique, des filtres, du CCD et de l'éclairage, comme expliqué dans la section § 6.3.6, page-sup. - 39 -. Désormais, l'utilisation des deux porte-filtres est envisagée pour d'autres applications, notamment des recherches sur la polarisation de la lumière.

## 6.2 Dispositif d'éclairage

En photographie, et particulièrement dans les applications scientifiques impliquant la mesure de la réflexion de la lumière la source lumineuse joue un rôle capital dans les systèmes de numérisation par caméra. Pour obtenir des mesures fiables des spectres de réflexion diffuse, il est indispensable de maîtriser plusieurs caractéristiques techniques de la lumière. Ce sous-chapitre détaille la conception des projecteurs de lumière et leur système de synchronisation avec la caméra multispectrale, et présente les recherches menées sur les types de sources de lumière, synthétisées dans un tableau comparatif, afin d'offrir une vue d'ensemble des solutions les plus efficaces et adaptées à ce domaine.

### 6.2.1 Caractéristiques d'une source de lumière

Le choix de la source lumineuse et de sa projection sur le plan de numérisation doit prendre en considération les paramètres suivants :

**Puissance lumineuse**
La luminosité doit être suffisante pour que la quantité de lumière atteignant le capteur de la caméra soit suffisante pour produire une image avec une bonne dynamique, nécessitant une amplification minimale, voire nulle, et permettant des temps d'exposition réduits pour limiter le bruit électronique.

**Spectre**
Le spectre de la lumière émise et sa répartition doit couvrir uniformément toutes les longueurs d'onde du capteur pour garantir une mesure plus précise du spectre de réflexion diffus de la lumière. Sinon, les systèmes de correction, nécessaires pour compenser les spectres inégaux (par amplification et ajustement du temps d'exposition), peuvent entraîner des coûts élevés en termes de rapport signal sur bruit (S.N.R.) et de plage dynamique de l'image.

**Stabilité spectrale et stabilité du flux**
Pour garantir la précision, la reproductibilité et la comparabilité des données, il est essentiel d'assurer la stabilité spectrale et la stabilité du flux lors de la mesure du spectre de réflexion diffuse. La stabilité spectrale permet une analyse plus précise des propriétés optiques des surfaces mesurées, tandis que la stabilité du flux assure la fiabilité des résultats. Des fluctuations dans le flux lumineux pendant la mesure peuvent entraîner des erreurs significatives dans l'interprétation des données, compromettant ainsi la validité de l'analyse.

**Collimation**
Les sources de lumière collimatée, caractérisée par une propagation parallèle, cohérente dans une direction spécifique sans dispersion, présentent un intérêt particulier dans notre contexte, notamment lorsqu'elles sont employées avec une caméra équipée d'un capteur linéaire qui n'a pas besoin d'éclairer la totalité du document mais uniquement la ligne en cours de numérisation. La collimation de la lumière est une propriété qui sera examinée (voir § 4.1, page 95).

**Configuration**
La position de la source de lumière exerce une influence déterminante sur le contraste et la tonalité de l'image, apportant des avantages significatifs lorsqu'il s'agit de mettre en relief les détails ou les textures, ou au contraire de les atténuer. L'angle de projection apporte aussi certaines propriétés de polarisation qui seront également examinées (voir § 4.1, page 95).

**Protection**
Dans le contexte spécifique de l'analyse de tableaux ou de la numérisation de palimpsestes, une attention particulière sera accordée à la protection contre les rayonnements inappropriés, tels qu'une exposition excessive à la chaleur qui peut provoquer une dilatation ou le dessèchement du support, aux rayonnements ultraviolets.

**Consommation**
Dans un esprit d'économie d'énergie une attention particulière sera portée au rendement du procédé de la source lumineuse, et à la durée de vie des lampes.

### 6.2.2 Conception optique du miroir réflecteur des projecteurs

Pour tenir compte de tous les paramètres énumérés précédemment ainsi que de la spécificité d'une caméra avec un capteur CCD linaire, un projecteur spécifique a été conçu dans le but de produire une bande de lumière qui cible uniquement une zone étroite de part et d'autre de la ligne numérisée par le capteur. Cette conception vise à minimiser la quantité de lumière reçue par le tableau ou le document lors de la numérisation. En réduisant l'éclairage au strict nécessaire, ce procédé permet d'éliminer les risques de surexposition sur le plan de numérisation et de préserver leur intégrité (voir § 2.5.1 page 48).

De plus, cette méthode d'éclairage présente l'avantage supplémentaire de réduire l'effet de *flare*, qui se manifeste par une réflexion indésirable des rayons lumineux à l'intérieur de l'optique, créant ainsi un effet de diffusion. En concentrant la lumière uniquement sur la zone visée par le capteur, les risques de *flare* sont significativement atténués, ce qui se traduit par des images plus nettes, plus contrastées et de meilleure qualité, dépourvues d'artefacts lumineux indésirables.

Le projecteur a été conçu selon le principe du miroir ellipsoïdal, un choix qui s'est avéré judicieux pour optimiser la concentration de la lumière. Dans un miroir de forme d'arc ellipsoïde, tous les rayons provenant d'une source lumineuse placée sur un des foyers de l'ellipse se reflètent concentrés sur l'autre foyer.

Pour parvenir à un compromis optimal en termes de praticité et de concentration de la lumière, plusieurs calculs ont été effectués. La distance entre les deux foyers F et F' de l'ellipse a été fixée à 2 mètres, tandis que la distance d'un centre F au bord le plus proche de l'ellipse a été établie à 5 cm. Cette configuration confère au projecteur un facteur de grandissement de la source ponctuelle de 40 fois (200/5) (voir Figure 181). La projection d'une source ponctuelle de 1 mm mesure donc 40 mm si la lumière incidente est à la normale.

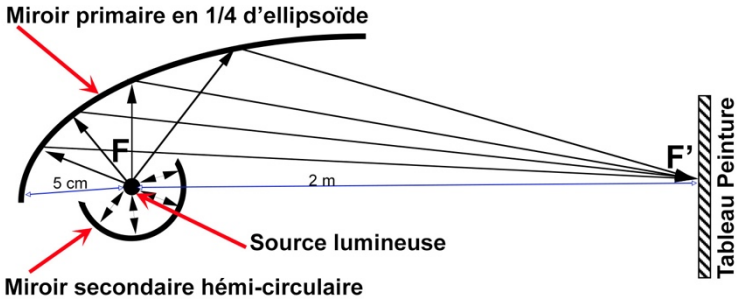



*Figure 181 -Vue en coupe simplifiée du principe opto-mécanique des projecteurs de la caméra.*

Ainsi, cette conception basée sur l'ellipsoïde assure une focalisation efficace de la lumière, répondant aux exigences spécifiques des besoins de numérisation avec un capteur linéaire, tout en garantissant une utilisation pratique et une concentration optimale de la lumière sur le plan de numérisation.

Pour maximiser l'utilisation de la lumière et minimiser les pertes, un miroir secondaire en forme demi-cisculaire est intégré au système. La source lumineuse est placée au centre de ce miroir qui a pour fonction de renvoyer les rayonnements lumineux perdus vers les sources de lumière et vers le miroir primaire principal, assurant ainsi une utilisation optimale de la lumière émise.

Dans sa phase initiale, le premier prototype de projecteur adoptait une forme de section d'arc de demi-ellipsoïde (voir Figure 182). Cependant, des expérimentations poussées ont révélé qu'en utilisant une section d'arc de quart d'ellipsoïde, le projecteur demeure presque aussi efficace, avec une perte de flux estimée à seulement 10% (voir Figure 181 et Figure 183). Cette correction avait pour objectif de réduire la complexité et les coûts de fabrication du projecteur tout en offrant une solution plus compacte. Enfin, elle simplifie sa mise en œuvre, facilitant ainsi son utilisation dans divers contextes d'application. Dans sa version initiale, le projecteur était composé d'une feuille d'aluminium polie et placée en tant que miroir sur des structures profilées en forme d'arc d'ellipsoïde. En 2011, le projecteur a été révisé afin de fournir une meilleure concentration et d'être pourvu d'une ventilation de refroidissement. Il a été fabriqué avec précision en usinant un seul bloc d'aluminium (voir Figure 184). C'est cette version qui est utilisée maintenant.

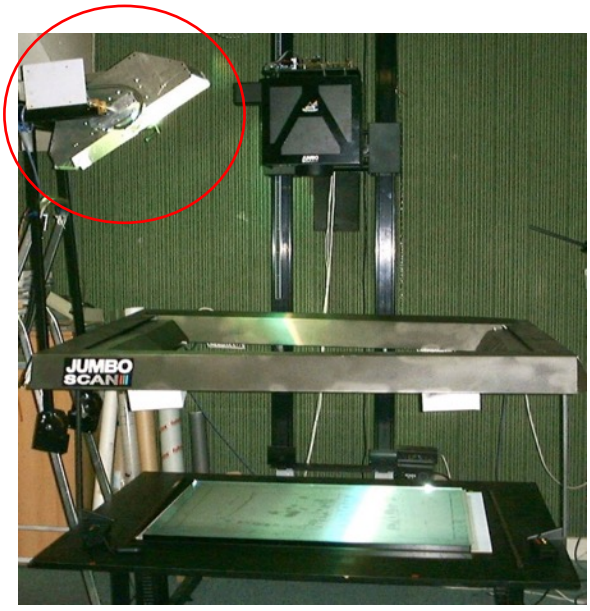



*Figure 182 - Prototype de projecteur en forme de section d'arc de demi-ellipse (en haut à gauche) la bande de lumière est projetée sur le plan.*

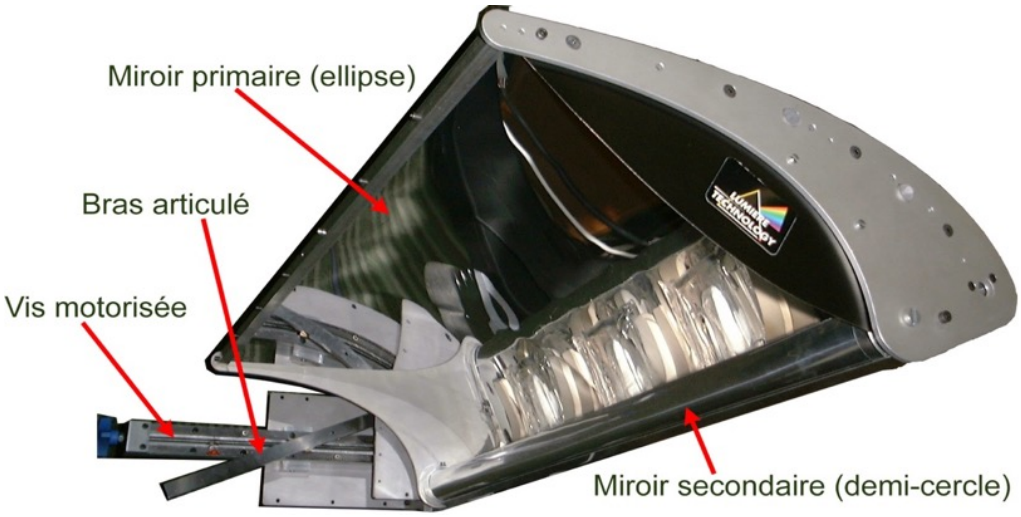



*Figure 183 - Projecteur en forme de section de quart d'ellipse fabriqué à partir d'une feuille d'aluminium polie.*

### 6.2.3 La motorisation et la synchronisation des projecteurs

Le dispositif de motorisation intégré au système comprend un mécanisme avec un bras articulé. Ce bras pivote autour d'un axe parallèle au flux lumineux émis par le projecteur, cet axe de rotation étant aligné avec le centre du reflet de ce flux sur le miroir (et non avec le foyer F de l'ellipse). Le mouvement du bras est assuré par un chariot actionné par une vis motorisée, contrôlée par la caméra. L'axe de cette vis est orienté parallèlement au plan de numérisation (voir Figure 183). Cette configuration, basée sur les principes de triangulation, garantit que chaque rotation complète de la vis induit un déplacement uniforme de la bande lumineuse sur le plan de numérisation, et ce, indépendamment de sa position spécifique sur ledit plan.

Le système d'éclairage se compose de deux projecteurs positionnés symétriquement de part et d'autre au plan de numérisation, à égale distance de la caméra et du plan de numérisation (voir Figure 184). Il fonctionne en boucle ouverte, ce qui signifie que la synchronisation des deux bandes de lumière doit être préalablement établie. La reproductibilité du processus est garantie par une position de référence définie pour chaque projecteur et par la mémorisation par la caméra des vitesses de progression respectives de ces derniers. Les faisceaux lumineux synchronisés tracent deux lignes de lumière qui s'étendent du sol au plafond. Ces lignes convergent vers le plan de numérisation, à leur intersection une croix lumineuse se forme au sol et au plafond. L'angle d'incidence que forme le flux lumineux avec la normale au plan de numérisation (axe de la caméra) dépend des choix de l'opérateur.

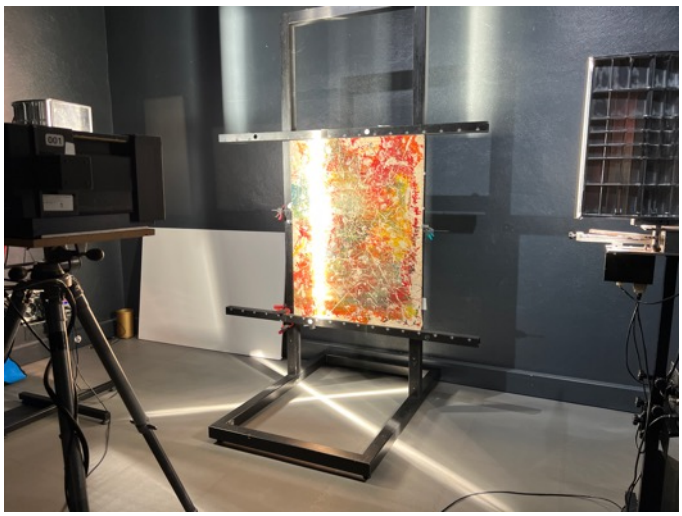


*Figure 184 - Les projecteurs, équipés de miroirs monoblocs aluminium, sont positionnés symétriquement au plan de numérisation. Ils produisent une bande de lumière collimatée étroite (ici, tungstène-halogène).*

### 6.2.4 Programme de recherche sur les sources de lumière et leur mise en œuvre

En plus des qualités requises déjà exposées (voir § 6.2.1, page-sup. - 24 -) pour le choix des sources de lumière, s'ajoute des considérations mécaniques de l'encombrement du bulbe de la lampe, de la dimension de l'arc électrique ou du filament et de l'électronique associée. La prise en compte de tous ces aspects doit garantir un bon fonctionnement des projecteurs et une mesure fiable et précise. Voici les sources de lumière mises en œuvre :

En 1997, les premières sources lumineuses utilisées dans les projecteurs étaient constituées de 19 lampes halogène de 100 W / 228 V AC alimentées en courant continu (DC). Celles-ci ont été remplacées en raison de leur durée de vie trop courte par 4 lampes à décharge HQI ou HCI de 150 W Rs7. Ces dernières ont été utilisées pendant de nombreuses années.

Entre 2020 et 2023, plusieurs expérimentations ont été menées afin d'optimiser les sources lumineuses utilisées : raccourcir les temps de stabilisation des spectres d'émission et de numérisation.

2020 : Des essais ont été réalisés avec deux lampes H.T.I. (*High Temperature Ignition*) de 300 W, combinées à une lampe "crayon" tungstène/halogène de 78 mm (120 W / 220 V), survoltée à 320 V. Cependant, cette technologie a été abandonnée en raison de l'instabilité du spectre d'émission.

2021 : De nouvelles expérimentations ont été effectuées avec trois lampes "crayon" tungstène/halogène de 78 mm (120 W / 220 V), également survoltées à 320 V. Cette approche a également été écartée, en raison de l'instabilité mécanique des filaments, trop longs et sujets à une dilatation excessive sous l'effet de la chaleur.

2022 : Des essais ont ensuite été menés avec 19 lampes H3 à bulbe tungstène/halogène à filament court de 100 W / 12 V/DC, survoltées à 13,8 V/DC. Cette technologie a été abandonnée à son tour, principalement en raison de la chaleur excessive générée par les lampes.

2023 : Une mise à jour des dispositifs a conduit au remplacement des technologies précédentes par 20 micro-lampes HID à arc au xénon de 100 W fonctionnant sous une tension de 13,8 V/DC. Cette solution est actuellement en service.

### 6.2.5 Mise en œuvre des lampes à décharges HQI/HCI et HID.

Les deux technologies utilisées sur de longues périodes sont examinées ci-après.

**• Les lampes à décharges HQI/HCI**

La famille de lampes à décharge au plasma de haute intensité (HID, pour *High Intensity Discharge*) désigne une catégorie générale de lampes qui utilisent un arc électrique pour produire de la lumière. Cette famille regroupe différents procédés et diverses dénominations commerciales.

Les lampes HQI (*Halogen Quartz Iodide*) et HCI (*Halogen Ceramic Iodide*) en sont des exemples. Les HQI utilisent un mélange de gaz halogènes, comme le brome ou l'iode, et des métaux halogénés, tandis que les HCI incluent également des sels de terres rares. Ces éléments influencent significativement le spectre d'émission de la lampe en modifiant les propriétés du plasma. La principale différence entre HQI et HCI réside dans la composition du tube à décharge, les HQI utilisant du quartz et les HCI de la céramique, ce qui affecte la durabilité et la qualité du spectre lumineux.

À chaque extrémité de l'ampoule, il y a une électrode. Lorsqu'une tension électrique est appliquée à ces électrodes, elle ionise le gaz à l'intérieur de l'ampoule, créant ainsi un plasma. Ce plasma est composé de gaz ionisé, d'ions positifs et d'électrons libres. Cet arc électrique génère de la chaleur et de la lumière. Lorsque les atomes excités du plasma se désexcitent, ils émettent de l'énergie sous forme de photons, produisant ainsi de la lumière visible. Dans ce système, le courant électrique circulant entre les électrodes est alterné, engendrant ainsi des micro-interruptions périodiques. Cependant, en raison de la haute fréquence et de l'asynchronisme des ampoules au sein d'un même projecteur, ces micro-extinctions sont indiscernables. La composition du plasma, déterminée par la nature des gaz, des métaux halogénés et des sels de terres rares, ainsi que la tension électrique appliquée, influe sur la couleur et le spectre de la lumière émise par les lampes. Elles offrent une lumière de haute qualité avec un rendu des couleurs élevé.

Les halogénures métalliques sont généralement le Chlorure de zinc (ZnCl2), le Bromure de mercure (HgBr2), le Fluorure de calcium (CaF2), l'Iodure de potassium (KI) et le Bromure de cuivre (CuBr).

Les lampes HCI utilisent divers éléments pour ajuster le spectre d'émission, incluant des terres rares qui influencent significativement les propriétés lumineuses (Voncken, 2015). Cependant, les compositions précises restent souvent des secrets de fabrication.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Thallium | 377.6 | | | | | 535.05 | | | 661.39 | | | | |
| Europium | | | | | | 578.0 | 590.6 | 617.0 | 652.3 | | 690.6 | | |
| Scandium | 361.4 | | 424.6 | | | 552.7 | 566.7 | | 660.4 | | | | |
| Erbium | 383.0 | 409.3 | 451.5 | | | 533.8 | | | 659.3 | | | | |
| Yttrium | 371.0 | 398.0 | 437.5 | | 508.7 | | 601.2 | 619.16 | 643.55 | | | | |
| Dysprosium | | | 451.1 | 473.9 | 490.0 | | 574.9 | | | 676.1 | | | |
| Praseodymium | | 409.0 | 462.7 | 468.1 | 491.2 | | | | 642.0 | | | | |
| Thulium | 370.5 | 458.4 | 465.5 | 475.1 | | | | | | | | | 794.3 |
| Holmium | 410.5 | 446.9 | 450.0 | 473.3 | | 537.2 | | | | | | | |

*Tableau 17 - Principales raies d'émission (nm) de quelques terres rares utilisées dans les lampes à décharges (HQI, HCI, HTI, HID, etc.)*

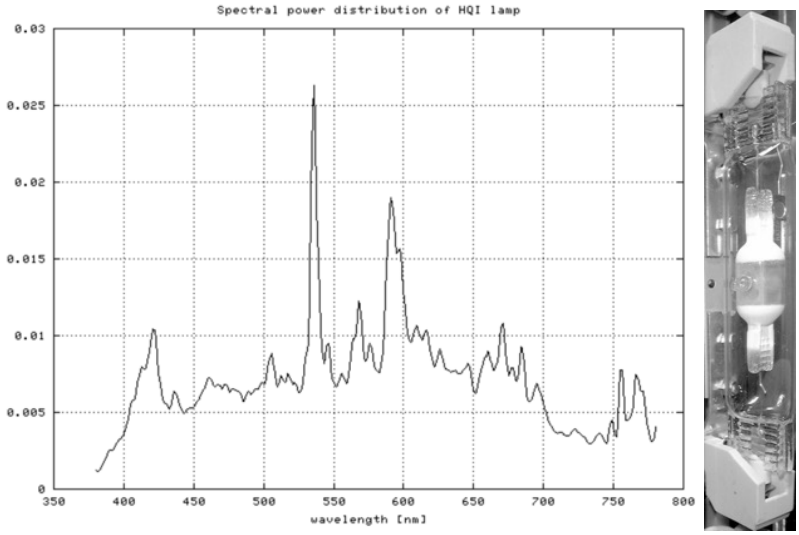



*Figure 185 - Lampe HQI version Neutral Day Light (NDL) 150 W - Rs7 et spectre d'émission. © Osram*

**Avantages**

Les lampes à décharge présentent une diversité de spectres lumineux, associée à un rendement lumineux élevé, atteignant jusqu'à 11 000 lumens pour une consommation de 150 watts. Leur coût est modéré. De plus, elles ne requièrent pas de système de refroidissement supplémentaire et offrent une durée de vie remarquablement longue, atteignant jusqu'à 15 000 h.

**Inconvénients**

Les lampes à décharge souffrent d'un temps de stabilisation du spectre particulièrement long d'environ 1 h 30 à 2h. Leur arc électrique est diffus dans le plasma et à une largeur, de 2 à 4 millimètres, ce qui réduit la concentration de la bande de lumière sur le plan de numérisation. Enfin, leur émission de rayonnement infrarouge au-delà de 900 nanomètres est quasi inexistant, les temps de numérisation des œuvres est d'environ 1 h à 2h.

**Expérimentation des lampes HQI/HCI**

Dans les premiers prototypes des projecteurs elliptiques, dès 1999, trois lampes HQI de 150W Rs7 étaient assemblées. Une version de 2002 de ces projecteurs, de taille plus grande, a permis de mettre quatre lampes (voir Figure 183). Malgré la production de chaleur, ces lampes ne nécessitent pas de système de ventilation. Leurs électrodes fonctionnent en courant alternatif à une fréquence de 110 Hz, générant ainsi en tension des signaux carrés et éliminant tout effet de scintillement. De plus, les flux asynchrones des deux projecteurs avec 8 (4 + 4) lampes se mélangent dans la bande lumière projetée.

Malgré leur défaut en termes d'émissions infrarouges dans la plage de 950/1 100, ces lampes ont été utilisées pendant de nombreuses années avec des résultats remarquables par beaucoup d'aspects. Elles présentent une bonne stabilité spectrale. L'arc électrique, mesurant entre 3 et 3.5 mm de large, émet une bande lumineuse plus large que d'autres technologies de lampes, tout en offrant l'avantage d'une synchronisation plus facile des deux projecteurs. En 2005, le nombre de projecteurs a été doublé (en superposant deux ellipses l'une sur l'autre (voir Figure 191), permettant ainsi d'illuminer des surfaces plus grandes et de doubler la quantité de lumière émise (16 lampes au total, 8 + 8). Leur coût abordable et leur longue durée de vie en ont fait une solution pratique et économique. Dans certaines configurations, l'utilisation de filtres anti-chaleur était nécessaire.

Cependant, en test réel avec la caméra, ces lampes présentent quelques inconvénients, notamment un temps de stabilisation spectrale trop long après l'allumage (voir Figure 186), mesuré à 1 heure et 30 minutes, ainsi que la génération de chaleur dans les configurations utilisant 16 lampes et des temps de numérisation pouvant dépasser les 2 heures pour les grandes peintures. C'est dans le but de résoudre ces problèmes qu'il a été entrepris l'étude de solutions d'éclairages plus performantes.

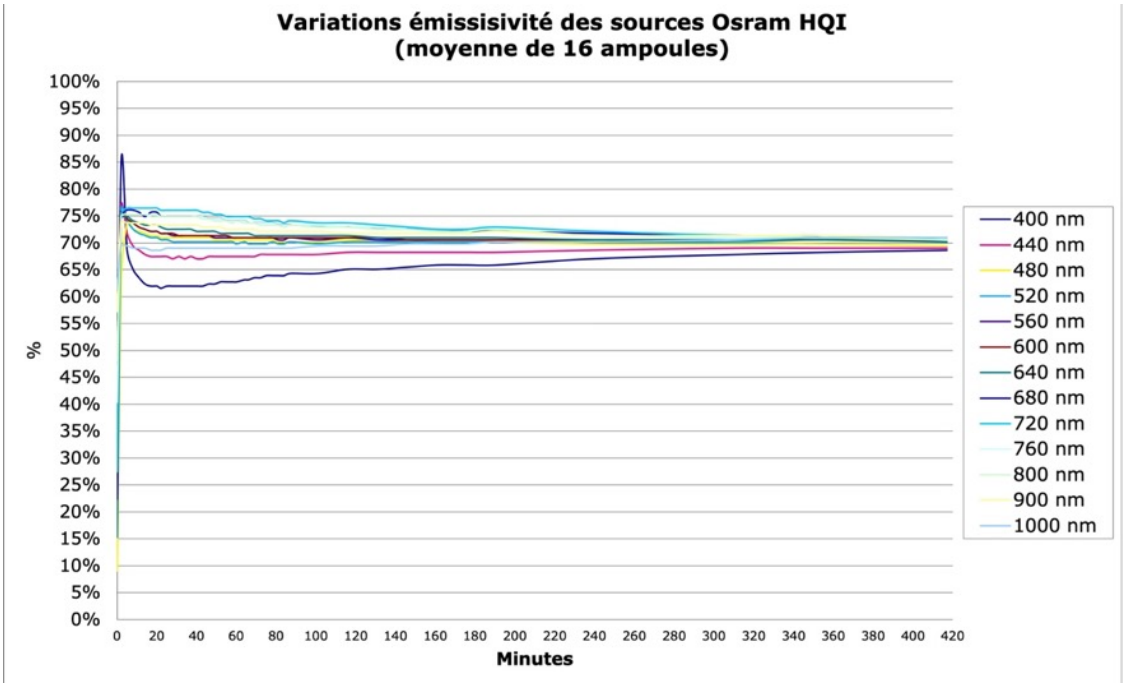



*Figure 186 - Moyenne des variations d'émissivité spectrale de 16 lampes HCI pour les 13 filtres de la caméra.*

### 6.2.6 Les lampes au xénon à décharge HID

Les lampes au xénon HID (*High-Intensity Discharge*) utilisent une technologie de décharge à haute intensité à travers du gaz xénon sous haute pression. A la différence des HQI/HCI et HTI il n'y a pas d'halogénure. Le courant électrique alternatif appliqué entre les électrodes du tube de quartz rempli de gaz xénon génère un arc électrique à travers le gaz, provoquant l'ionisation et la production de lumière (Flesch et Neiger, 2004). Comme les HQI/HCI/HTI l'arc électrique est alternatif à haute fréquence (jusqu'à 200 Hz), les micro-extinctions sont indiscernables.

Ces lampes sont caractérisées par l'ajout de différentes terres rares dans le tube de décharge. Ces mélanges permettent une large gamme de températures de couleur, allant de 3 000 à 12 000 Kelvin.

*Figure 187 - Différentes températures de couleur proposées pour les lampes HID xénon.*

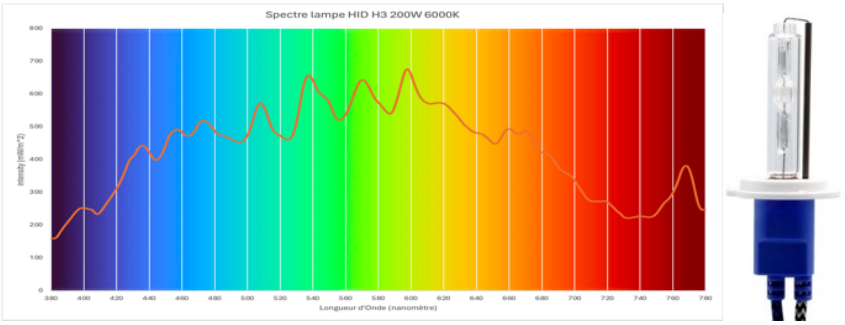
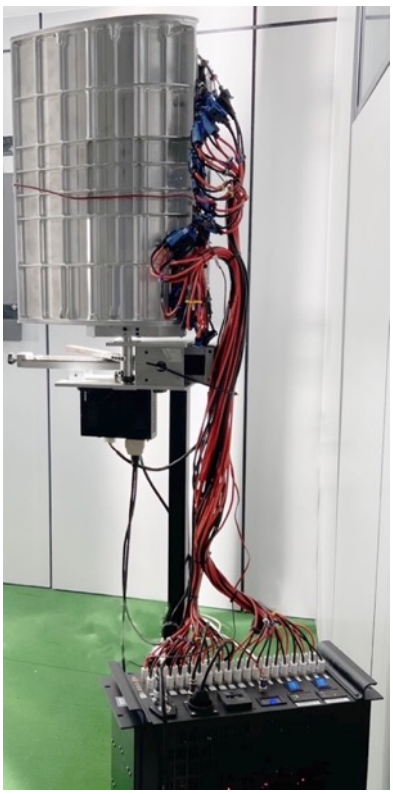



*Figure 188 - Lampe xénon HID H3. 200 W - 6000 K. © Mesures Dr. Kadja Rebec*

Avantages

Les lampes à décharge HID au xénon se distinguent par leur large gamme de températures de couleurs et leur rendement lumineux élevé, pouvant atteindre jusqu'à 6000 lumens avec une consommation de 100 watts. Elles parviennent à générer un spectre stable en 30 minutes. Elles sont économiques.



Inconvénients

Néanmoins, ces lampes comportent plusieurs désavantages. Leur émission infrarouge est restreinte et produisent une quantité significative de chaleur. De plus, ces lampes étant dotées d'un culot en plastique, leur utilisation est restreinte à des environnements sans sources de chaleur immédiates. En conséquence, un mécanisme de refroidissement actif, tel qu'une ventilation, devient indispensable, surtout lorsqu'elles sont utilisées en grande quantité dans un dispositif projecteur. Un autre inconvénient pourrait être la position de l'arc électrique, qui est disposé verticalement, perpendiculairement à l'axe de l'ellipse de projection. Cette orientation pourrait contribuer à une répartition moins concentrée de la lumière sur le plan de numérisation avec une facteur de grandissement de 40X. L'utilisation très intense des électrodes affecte la durée de vie des lampes (Dong *et al.*, 2008).

*Figure 189 - Projecteur équipé de 20 HID xénon. Ici, monté sur support motorisé et avec boitier électronique.*

**Expérimentation des lampes HID xénon de 100 W**
Les micro-lampes HID Xénon sont une solution économique mais complexe à mettre en œuvre. Elles offrent les avantages d'émettre un spectre large de 380 nm à 1100 nm dans leur version 6 000 K et d'être économiques.

**Choix de la température de couleur des lampes HID xénon**
Les expérimentations menées avec ce modèle de lampe, couvrant des températures de couleur allant de 3 000 à 12 000 K, ont révélé que ces températures sont atteintes par un processus qui consiste à réduire ou éliminer certains éléments émissifs dans le spectre lumineux, probablement par une diminution de certaines terres rares. Plutôt que d'ajouter des composants pour intensifier certaines bandes spectrales, cette méthode ajuste la température de couleur en modulant le spectre par le retrait contrôlé de certains constituants émettant intensément dans des bandes particulières.

En conclusion de ces tests, la version des lampes HID xénon la plus complète et puissante, dans la gamme testée, est celle de 6 000 K. Elle offre une couverture presque totale du spectre visible ainsi que des infrarouges (voir Figure 188).

**Mise en œuvre**
La mise en œuvre de ces lampes se révèle complexe, nécessitant que chaque lampe soit équipée de son propre dispositif de démarrage (starter), de son propre ballast et de son propre câble de connexion. Aucun câblage en distribution n'est envisageable. Les amorçages des lampes exigent une tension de 30 000 Volts, ce qui impose une isolation parfaite entre les lampes, leurs câbles et leurs connecteurs de connexion. De plus, il est indispensable d'assurer une ventilation adéquate des lampes et des ballasts. Ces difficultés techniques surmontées il a été possible de monter 20 lampes produisant une bande de lumière de 120 000 lux projetée sur le plan de numérisation à 2 mètres.

**Une lumière pulsée mais perçue continue**
Les lampes à décharge haute intensité (HID) exploitent un arc électrique de nature pulsée, engendré par l'utilisation d'un courant alternatif à 240 Hz. Ce mode de fonctionnement contribue à préserver les électrodes, prolongeant ainsi leur durée de vie. Une mesure réalisée à l'aide d'un oscilloscope et d'une photodiode (voir Figure 190) a mis en évidence la nature alternée du signal lumineux émis par ces lampes. Cependant, la vitesse de commutation de l'arc, estimée à quelques nanosecondes, demeure imperceptible pour la caméra, même lorsqu'elle est réglée sur un temps d'exposition minimal de 1.3 ms. En pratique, la lumière projetée sur le plan de numérisation est d'une grande stabilité, puisqu'elle est issue de quarante sources HID fonctionnant de manière asynchrone. Ainsi, du point de vue de la caméra, la lumière émise par les deux projecteurs paraît comme un flux lumineux continu.

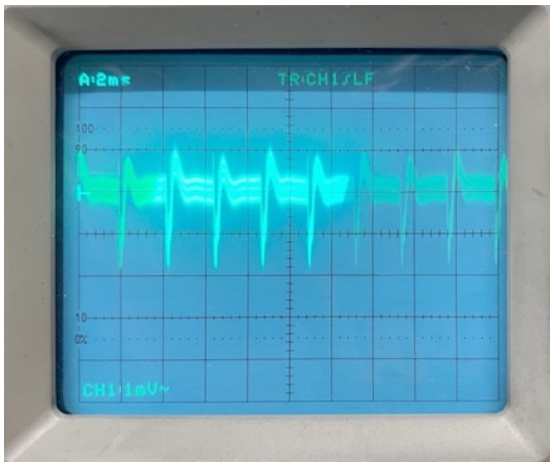



*Figure 190 - Oscilloscope, signal lumineux d'une lampe HID 6000K 200W mesuré avec une photodiode. Échelles : Abscisse 2 ms, Ordonnée 1mV.*

**Une bande de lumière projetée de 50 mm de large**

L'arc électrique, d'une longueur de 2,5 mm (Sugitani et al., 2006) et situé orthogonalement par rapport à l'axe du miroir elliptique, produit une bande lumineuse dont la largeur n'excède pas 50 mm lorsqu'il est positionné à une distance optimale de 2 mètres, avec une incidence normale sur le plan de numérisation. Théoriquement, l'utilisation d'un miroir elliptique, qui amplifie la source lumineuse placée en son foyer $F$ par un facteur de 40 en son foyer $F$', devrait résulter en une bande lumineuse de 100 mm de largeur (40 x 2.5 mm). Cet écart pourrait s'expliquer par une concentration de luminosité accrue au centre de l'arc électrique. Compte tenu de la nature pulsée des lampes à décharge haute intensité (HID), cette caractéristique pourrait influencer la distribution de la lumière émise, l'intensité de l'arc variant avec la fréquence du courant électrique. À une fréquence de 240 Hz, l'arc électrique se reforme à chaque demi-cycle, ce qui pourrait altérer l'uniformité de l'émission lumineuse au fil du temps. Néanmoins, la luminosité projetée sur le plan de numérisation demeure remarquablement uniforme et intense, facilitant ainsi les procédures de synchronisation des dispositifs de mesure.

### 6.2.7 Synthèse d'analyse des sources de lumière

| Les chiffres en orange sont des estimations | 1998<br>Halogène bulbe 100 W 12 V - AC | 1999<br>HQI-TS 150 W /NDL | 2005<br>HQI-TS 150 W /NDL | 2008<br>Xénon XBO 450W/2 OFR | 2020<br>Baby SharXS HTI 300 W/65 | 2021<br>Halogène Haloline 78 mm 220 V 150 W | 2022<br>Halogène bulbe 100 W 12 V - DC | 2023<br>Xénon HID 100 W 12 V - DC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de lampes par projecteur | 19 | 4 | 8 | 1 | 2 | 3 | 19 | 20 |
| Tension de fonctionnement (V) | 228 | | | | | 320 | 14 | |
| Puissance d'une ampoule (W) | 100 | 150 | 150 | 450 | 300 | 310 | 100 | 100 |
| Puissance d'un projecteur (W) | 1 900 | 600 | 1 200 | 450 | 600 | 930 | 1 900 | 2 000 |
| Lumens | 2 300 | 11 250 | 11 250 | 13 000 | 22 000 | 2 250 | 2 300 | 6 000 |
| Température de couleur (K) | 3 200 | 4 200 | 4 200 | 6 500 | 6 500 | 2 900 | 3 200 | 6 000 |
| Lumens suralimentées | | | | | | 5 400 | 3 450 | |
| Température de couleur (K) suralimentées | | | | | | 3 200 | 3 400 | |
| Total Lumens pour un projecteur | 43 700 | 45 000 | 90 000 | 13 000 | 44 000 | 16 200 | 65 550 | 120 000 |
| Largeur filament ou arc électrique (mm) | 1.5 | 3.5 | 3.5 | 0.9 | 2 | 1 | 1.5 | 2.5 |
| Temps de stabilisation du spectre (minutes) | 30 | 90 | 90 | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 |
| Stabilité spatiale (Jitter) | oui | oui | oui | non | non | non | oui | oui |
| Stabilité du flux | oui | oui | oui | oui | oui | oui | oui | oui |
| Concentration de la bande de lumière à 2 m | 40 mm | 100 mm | 100 mm | 40 mm | 25 mm | 50 mm | 40 mm | 50 mm |
| Lux (projecteur dans l'axe à la normale) à 2 m | 35 000 | 25 000 | 25 000 | 22 000 | 35 000 | 35 000 | 60 000 | 120 000 |
| Durée de vie (heures) | 50 | 12 000 | 12 000 | 100 | 750 | 200 | 200 | 500 |
| Electronique | Transfo DC | Ballast | Ballast | Ballast | Ballast | Redresseur | Transfo | Ballast |
| Fréquence Hz | continu | 110 Hz | 110 Hz | continu | 200 Hz | 100 Hz | continu | 240 Hz |
| Ultra Violet | non | non | non | oui | oui | non | non | non |
| Infrarouge | oui | peu | peu | oui | peu | oui | oui | oui |
| Ventilation | non | non | non | oui | oui | oui | oui | oui |
| Prix des lampes | faible | moyen | moyen | élevé | moyen | faible | faible | faible |

*Tableau 18 - Synthèse des tests des différentes sources de lumière.*

En résumé les lampes HQI/HCI ont été un bon choix de départ elles sont avantageusement remplacées maintenant par les lampes HID Xénon.

## 6.3 Installation et calibration de la caméra

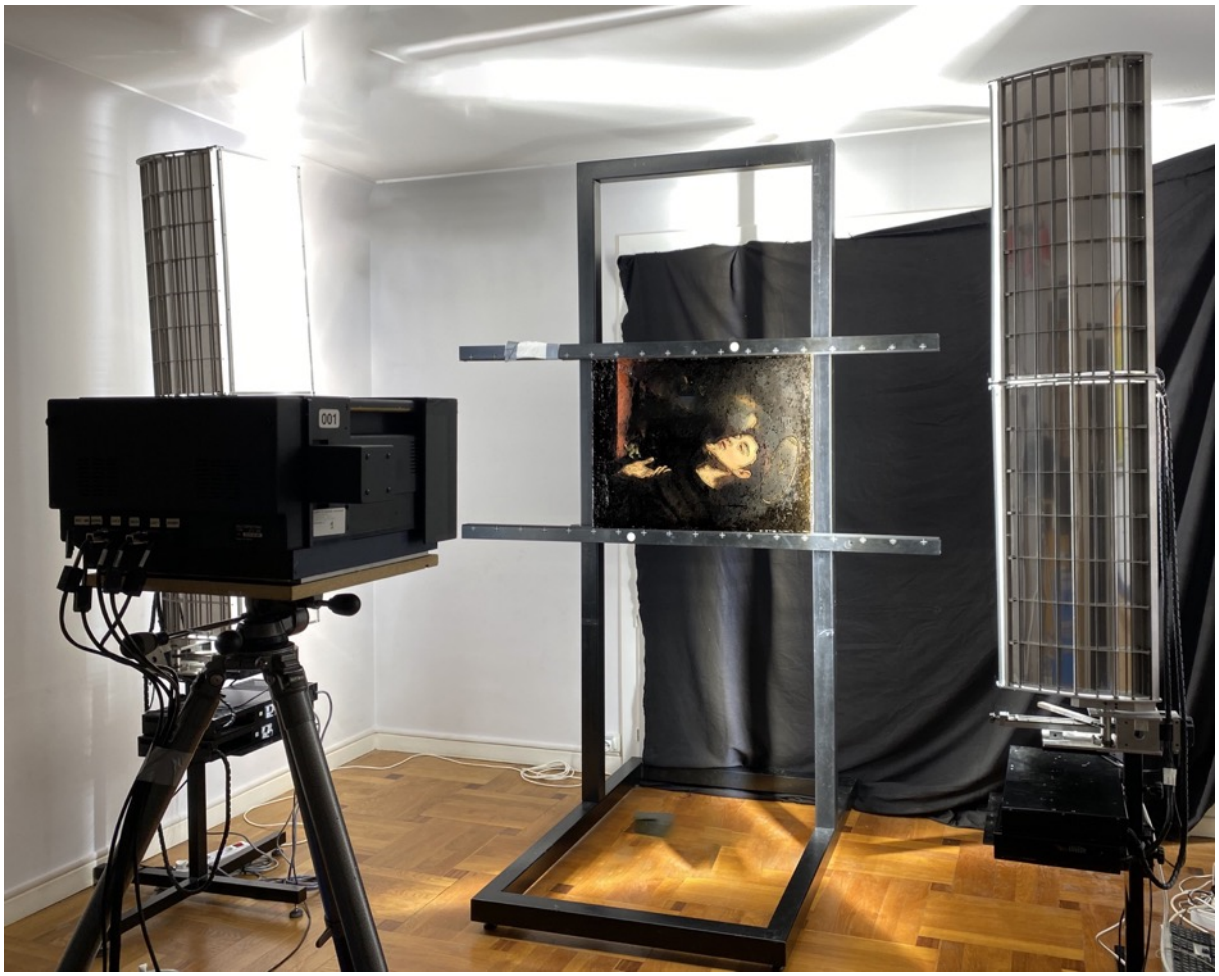


*Figure 191 - Installation de la caméra et des projecteurs double ellipses superposées - deux barres de maintien supportent des mires de repère et des blancs de référence en téflon.*

### 6.3.1 Installation des équipements

La caméra multispectrale, système transportable, permet de numériser des œuvres d'art directement sur leur site de conservation ou d'exposition. L'installation de l'équipement, incluant la caméra, les projecteurs et le chevalet, exige des précautions spécifiques. Initialement, un panneau de référence blanc en téflon, dont la réflectance est connue et qui est de dimensions équivalentes ou supérieures à l'œuvre à numériser, est installé sur le chevalet. Ce panneau sert de référence d'acquisition et établit le plan de numérisation auquel tous les documents à numériser doivent se conformer spatialement.

Dans un deuxième temps, les projecteurs sont positionnés selon les dimensions de l'œuvre. Les centres des ellipses de lumière sont alignés avec l'axe central du document. L'écartement entre les deux projecteurs et la distance les séparant du plan de numérisation dépendent des particularités des tableaux ou documents à numériser. Les lignes de lumière verticales émises par chaque projecteur et projetées sur le plan de numérisation doivent être parallèles.

La phase finale de l'installation consiste à positionner avec précision la caméra multispectrale. La distance entre le document et la caméra, basée sur le plan du capteur, est déterminée par la hauteur et la largeur de l'œuvre, permettant d'obtenir des résolutions de 250 à 1200 dpi. L'axe optique de l'objectif est centré sur l'œuvre, et la barrette linéaire du capteur CCD doit être parallèle aux faisceaux

lumineux, avec le plan d'image parfaitement parallèle au plan du document. Cette précision d'alignement est réalisée à l'aide d'un laser, qui utilise la réflexion du rayon sur la vitre de protection du CCD pour garantir l'exactitude géométrique nécessaire.

### 6.3.2 Réglages des focus et synchronisation des lampes

La focalisation, ajustée avec une précision de 0,04 mm, s'effectue initialement sans aucun filtre devant le capteur. Cette opération est réalisée à l'aide de mires de repérage à haut contraste, lesquelles sont fixées sur les barres de maintien des œuvres, substituant ainsi le panneau de référence blanc. Ce réglage de mise au point est ensuite réitéré individuellement pour chacun des treize filtres.

La synchronisation des lampes avec le déplacement du capteur est réalisée automatiquement par le logiciel de gestion de la caméra multispectrale sur le panneau de blanc.

### 6.3.3 Réglages des gains et temps d'exposition

Pour la calibration des gains et des durées d'exposition spécifiques à chaque filtre, le panneau de référence blanc en téflon est replacé devant la caméra. Toutefois, la configuration particulière de l'éclairage ainsi que les imperfections optiques intrinsèques et les défauts de réponse individuelle de chaque pixel du capteur (*Photo Response Non-Uniformity*, PRNU) entraînent une hétérogénéité de la répartition du blanc sur la surface du panneau. Il est par conséquent impératif d'identifier la zone la plus lumineuse afin d'y effectuer les réglages nécessaires des gains et des temps d'exposition. L'optimisation du couple d'exposition pour chaque filtre, comprenant le temps d'intégration et le gain de l'amplificateur, est ainsi réalisée en visant un niveau proche de la saturation sans toutefois l'atteindre. Pour garantir une qualité de signal optimale, le gain est réglé au minimum, idéalement inférieur à 8 dB (voir Tableau 19 page-sup. - 38 - et Tableau 12 page-sup. - 6 -).

### 6.3.4 Évaluations des qualités numériques et visuelles de la caméra

L'évaluation de la qualité d'image d'une caméra repose sur une analyse détaillée des différents types de bruits qui affectent les données numérisées. Ces bruits comprennent le bruit de courant d'obscurité (*dark current noise*), la non-uniformité de la réponse photoélectrique (*PRNU*), et le bruit de lecture, amplifié par le gain du système. L'impact de ces bruits sur la qualité globale est modélisé à l'aide de deux coefficients, $\alpha$ et $\beta$, intégrés dans une formule globale de qualité.

Coefficient $\alpha$ : Impact du temps d'exposition

Le coefficient $\alpha$ est principalement lié au bruit de courant d'obscurité, qui est directement proportionnel au temps d'exposition $t$. Ce bruit est représenté par le signal d'obscurité moyen (*Pixel average dark signal, VDS*), exprimé en microvolts par milliseconde (µV/ms). En tenant compte de l'impact de ce bruit, $\alpha$ est défini comme suit :

$$\alpha = VDS \qquad \textit{Eq. ( 37 )}$$

Dans l'équation de qualité, $\alpha$ influence le terme lié au temps d'exposition, montrant comment l'augmentation du temps d'exposition accroît le bruit de courant d'obscurité et, par conséquent, dégrade la qualité de l'image.

Valeur de α (Alpha) : 110 µV/ms (voir § 6.1.1 page-sup. - 2 -)

Coefficient $\beta$ : Impact des non-uniformités et du bruit de lecture

Le coefficient $\beta$ regroupe l'impact de la non-uniformité de la réponse photoélectrique (*PRNU*) et du bruit de lecture. Le coefficient $\beta$ est défini par :

$$\beta = PRNU + \text{Facteur de Conversion par Électron} \qquad \textit{Eq. ( 38 )}$$

Le *PRNU* mesure la variation de la sensibilité des pixels du capteur à une lumière uniforme, souvent exprimée en pourcentage. Cette non-uniformité entraîne des différences de signal entre pixels, ce qui introduit du bruit dans l'image finale.

Le Facteur de Conversion par Électron indique combien de microvolts (µV) sont produits par chaque électron généré dans le capteur. Il est directement lié à la sensibilité électrique du capteur et à la manière dont les électrons sont convertis en un signal électrique mesurable.

L'addition du *PRNU* et du facteur de conversion dans l'équation $\beta$ peut sembler contre-intuitive au premier abord, car ils représentent des concepts différents : le *PRNU* est une mesure relative (variation en pourcentage), tandis que le facteur de conversion est un coefficient (en µV/e-). Cependant, pour simplifier le modèle, le *PRNU* est traité comme une source de variation du signal pouvant être approximativement convertie en une contribution absolue au bruit (en µV) lorsqu'elle est amplifiée par le gain et le facteur de conversion. Cette simplification permet de regrouper les différentes sources de bruit dans une seule mesure homogène, facilitant ainsi le calcul de la qualité globale de l'image.

Valeur de $\beta$ (Beta) : 6 + 0.06 = 6.06 µV/e- (voir § 6.1.1 page-sup. - 2 -)

Le gain $G$, exprimé en dB et converti en gain linéaire, amplifie ces bruits, dégradant ainsi la qualité d'image. Dans l'équation de qualité, $\beta$ est multiplié par le gain $G$ au carré et par le temps d'exposition $t$ pour quantifier l'impact combiné de ces bruits amplifiés sur la qualité.

**Formule globale de la qualité**

La qualité globale d'image $Q_{\text{global}}$ est modélisée par l'équation suivante :

$$Q_{global} = \frac{1}{\alpha \times t + \beta \times t \times G^2} \qquad \textit{Eq. ( 39 )}$$

Avec $t$ le temps d'exposition en millisecondes et $G$ le gain linéaire, calculé à partir du gain en dB selon la formule :

$$G = 10^{\frac{Gain\ (dB)}{20}} \qquad \textit{Eq. ( 40 )}$$

$\alpha \times t$ : Ce terme reflète l'impact du bruit de courant d'obscurité, proportionnel au temps d'exposition, sur la qualité de l'image.

$\beta \times t \times G^2$ : Ce terme montre comment les non-uniformités et le bruit de lecture, pondérés par $\beta$, sont amplifiés par le gain $G$ et le temps d'exposition.

Cette formule permet d'évaluer la qualité d'image en tenant compte à la fois du bruit de courant d'obscurité, amplifié par le temps d'exposition, et des non-uniformités du capteur et du bruit de lecture, amplifiés par le gain et le temps d'exposition.

**Pondération par la sensibilité photopique**

Pour évaluer la qualité perçue par un observateur humain, la formule de qualité peut être pondérée en fonction de la sensibilité photopique de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde. Cette pondération donne une mesure plus réaliste de la qualité perçue, en tenant compte de la manière dont les humains perçoivent les différentes de détails et couleurs :

$$Q_{global_weighted} = Q_{global} \times Sensibilité\ Photopique \qquad Eq.\ (41)$$

**Résultats des Calculs**

Les notes globales sont calculées en prenant la moyenne des $Q_{\text{global}}$ pour évaluer la qualité des données numérisées, et une moyenne pondérée par la sensibilité photopique des $Q_{\text{global_weighted}}$ pour estimer la qualité visuelle perçue par un utilisateur humain. Cette approche d'évaluation de la qualité permet de concilier les exigences techniques de précision des données avec les critères de qualité visuelle.

| Filtres soft-coating (1999) - éclairage HQI (2003) | | | | | | | | | Filtres hard-coating (2021) - éclairage xénon H3 (2023) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Filtre L.O.D. (nm) | Bande passante | Gain | Gain (dB) | Gain (Linear) | Temps d'exposition (ms) | Quality global refined | Photopic Sensitivity | Quality global weighted | Filtre L.O.D. (nm) | Bande passante | Gain | Gain (dB) | Gain (Linear) | Temps d'exposition (ms) | Quality global refined | Photopic Sensitivity | Quality global weighted |
| 400 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 41 | 0.165 | 0.0004 | 0.000 | 400 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 42,7 | 0.178 | 0.0004 | 0.000 |
| 440 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 23 | 0.294 | 0.04 | 0.012 | 440 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 13,6 | 0.558 | 0.04 | 0.022 |
| 480 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 21 | 0.322 | 0.23 | 0.074 | 480 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 9,6 | 0.790 | 0.23 | 0.182 |
| 520 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 12 | 0.564 | 0.71 | 0.400 | 520 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 7,7 | 0.985 | 0.71 | 0.699 |
| 560 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 12 | 0.564 | 1.0 | 0.564 | 560 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 6,7 | 1.132 | 1.0 | 1.132 |
| 600 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 10 | 0.676 | 0.95 | 0.642 | 600 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 6,4 | 1.185 | 0.95 | 1.126 |
| 640 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 13 | 0.520 | 0.5 | 0.260 | 640 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 7,3 | 1.039 | 0.5 | 0.519 |
| 680 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 13 | 0.520 | 0.15 | 0.078 | 680 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 7,3 | 1.039 | 0.15 | 0.156 |
| 720 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 28 | 0.242 | 0.03 | 0.007 | 720 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 11,6 | 0.654 | 0.03 | 0.020 |
| 760 | 40 | 298 | 8,0 | 2,5 | 26 | 0.260 | 0.01 | 0.003 | 760 | 40 | 250 | 5,7 | 1,9 | 11,6 | 0.654 | 0.01 | 0.007 |
| 800 | 100 | 298 | 8,0 | 2,5 | 13 | 0.520 | 0.001 | 0.001 | 800 | 65 | 250 | 5,7 | 1,9 | 23,1 | 0.328 | 0.001 | 0.000 |
| 900 | 100 | 298 | 8,0 | 2,5 | 15 | 0.451 | 0.00001 | 0.000 | 900 | 100 | 250 | 5,7 | 1,9 | 11,1 | 0.683 | 0.00001 | 0.000 |
| 1000 | 100 | 550 | 19,8 | 9,8 | 34 | 0.043 | 0.0 | 0.000 | 1000 | 100+ | 300 | 8,1 | 2,5 | 35,7 | 0.189 | 0.0 | 0.000 |
| | | | Notes globales | | | **0.395** | | **0.564** | | | | Notes globales | | | **0.724** | | **1.067** |

*Tableau 19 - Paramètre d'exposition pour la numérisation de St. Jacques le Mineur, Georges de la Tour, Musée Toulouse Lautrec, Albi en 2003 avec les filtres soft-coating et l'éclairage HQI (2 x 4 lampes) (←)*

*Tableau 20 - Paramètre d'exposition pour la numérisation de la Madone du Silence c.1560, huile sur bois, 58.3x43.2cm. Coll. Privée en 2024 avec les filtres hard-coating et l'éclairage au xénon H3 (2 x 20 lampes) (→)*

La comparaison des deux numérisations montre des nets accroissements de la qualité des mesures et de la qualité des images visuelles avec les filtres *hard-coating* et les lampes HID xénon H3.

### 6.3.5 Équation générale de correction du pixel

Il est important de noter que les composants de cette caméra - incluant les capteurs CCD, les filtres, les éléments d'optique, ainsi que les sources de lumière et leurs projecteurs - possèdent des spécificités techniques distinctes. Chacun de ces éléments influe sur la qualité des données capturées et nécessite des ajustements précis pour garantir une mesure fiable de la réflectance. Pour aborder cette complexité, une équation générale qui intègre ces divers paramètres a été formulée.

Conçue pour optimiser la précision et la fiabilité des données capturées par un capteur CCD linéaire dans une caméra multispectrale, cette équation tient compte des divers paramètres optiques et électroniques, y compris les caractéristiques de la source lumineuse, la répartition de la lumière, ainsi que l'ensemble des éléments optiques comme le vignettage, la transmittance des lentilles et des filtres, et la sensibilité spectrale du capteur. De plus, elle corrige les non-uniformités telles que la réponse des pixels (PRNU), le bruit de fond sombre (*Dark Current Noise*), et le courant d'obscurité, garantissant ainsi l'uniformité et la précision des mesures.

Il faut noter que cette équation ne tient pas compte du bruit de photon, ou *shot noise*, qui est intrinsèquement aléatoire et dépendant du nombre de photons effectivement détectés par chaque pixel. Ce type de bruit est donc variable et ne peut pas être corrigé à l'avance par des formules statiques. Néanmoins, l'équation fournit une base robuste pour le traitement des images en réduisant significativement les autres sources de bruit et de variation, ce qui permet une analyse plus fiable des données capturées.

$$p_{(x,y)} = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [\sigma(\lambda) \cdot l_r(\lambda) \cdot E(x,y,\lambda) \cdot o(x,y,\lambda) \cdot k(y,\lambda) \cdot v(x,y,\lambda) \cdot r_{wb}(\lambda)] - \mu(y) - \gamma(y)}{\big(1-\xi(y)\big) \cdot (\lambda_{max} - \lambda_{min})} - N(y) \qquad \textit{Eq. ( 42 )}$$

Avec :

$p_{(x,y)}$ - La valeur du pixel à la position $(x, y)$ Cette valeur est calculée pour chaque position du capteur CCD à mesure qu'il se déplace en $x$, avec $y$ étant la ligne du CCD et en tenant compte des variations spatiales, de la sensibilité spectrale et des corrections de bruit.

$\sigma(\lambda)$ - Sensibilité spectrale du capteur CCD à la longueur d'onde $\lambda$, définissant l'efficacité avec laquelle le capteur convertit la lumière incidente en signal électrique.

$l_r(\lambda)$ - Spectre de la source lumineuse utilisée pour éclairer la scène, indiquant l'intensité de la lumière à différentes longueurs d'onde.

$E(x, y, \lambda)$ - Distribution de l'énergie lumineuse sur le plan de numérisation à la position $(x, y)$ pour chaque longueur d'onde $\lambda$.

$o(x, y, \lambda)$ - Transmittance optique du système à la position $(x, y)$ et à la longueur d'onde $\lambda$, qui prend en compte la perte de lumière à travers les éléments optiques.

$k(y, \lambda)$ - Transmittance du $k$ ème filtre pour le pixel à la position $y$ à la longueur d'onde $\lambda$, spécifiant la quantité de lumière de différentes longueurs d'onde qui atteint le capteur après le filtrage.

$v(x, y, \lambda)$ - Vignettage à la position $(x, y)$ et à la longueur d'onde $\lambda$, représentant la diminution de l'intensité lumineuse due à l'éloignement du centre optique.

$\mu(y)$ - Bruit de fond sombre (*dark current*) pour le pixel à la position $y$ sur le CCD linéaire, représentant le bruit thermique intrinsèque du capteur en l'absence de lumière.

$\gamma(y)$ - Non-uniformité du courant d'obscurité (DCNU) pour le pixel à la position $y$ sur le CCD linéaire, compensant pour la variation du bruit de fond sombre entre les pixels.

$\xi(y)$ - Correction de la non-uniformité de réponse des pixels (PRNU) pour le pixel à la position $y$ sur le CCD linéaire, ajustant pour les variations de sensibilité entre différents pixels.

$N(y)$ - Bruit de lecture pour le pixel à la position $y$ sur le CCD linéaire, indiquant le bruit introduit par l'amplificateur de sortie du capteur lors de la conversion du signal lumineux en signal électrique.

$r_{wb}(\lambda)$ - Réflectance du blanc de référence à la longueur d'onde $\lambda$, utilisée pour normaliser les mesures à une référence qui réfléchit uniformément à toutes les longueurs d'onde. Cette réflectance est mesurée préalablement avec un spectrophotomètre.

$d\lambda$ - Élément différentiel pour l'intégration, représentant le segment de la gamme de longueurs d'onde du filtre sur laquelle l'intégration est réalisée (voir Figure 170 page-sup. - 17 -) Ce terme est utilisé pour intégrer sur l'ensemble du spectre d'intérêt, de $\lambda_{min}$ à $\lambda_{max}$.

### *6.3.6 Flatfied*

La méthode du *flatfied* permet, sans connaissance préalable de ces paramètres, de faire une normalisation complète des pixels.

C'est une technique de traitement d'image couramment utilisée en photographie et en imagerie scientifique pour corriger les inhomogénéités et uniformiser les images numériques, en intégrant également les corrections des bruits de mesure. Voici une description détaillée de cette méthode avec les équations :

**Prise d'images *dark frames* avec optique obstruée**

Les 13 images noires (*dark frames*) à pleine définition de 12 000 x 20 000 pixels sont capturées avec l'optique obstruée pour enregistrer les trois principales sources de bruit du capteur : $\mu(y)$ le *dark current*, $\gamma(y)$ le DCNU, et $N(y)$ le bruit de lecture. Chaque filtre de la caméra ayant ses propres réglages de gain et de temps d'exposition, ces bruits varient en fonction des filtres utilisés. En capturant une image noire pour chacun des 13 filtres, les caractéristiques spécifiques de ces bruits pour chaque réglage sont ainsi enregistrées.

Ces images sont essentielles pour isoler les bruits en l'absence de lumière externe et prendre en compte les variations induites par les différents réglages de chaque filtre. De plus, ce procédé permet également de capturer une partie du *shot noise*, en particulier pour les filtres nécessitant des temps d'exposition longs, où le *shot noise* peut devenir significatif même en présence d'un très faible nombre de photons.

**Prise d'images de référence *flat***

Les 13 images *flat* sont prises en exposant le capteur à une surface uniformément blanche, en utilisant un panneau de blanc de référence en téflon placé dans le plan de numérisation, éclairé par les projecteurs synchronisés. Bien que l'éclairage ne soit pas parfaitement uniforme, le panneau blanc assure une réflectance proportionnelle à la quantité d'éclairement reçu. Ces images permettent d'enregistrer simultanément plusieurs facteurs influençant la fiabilité des mesures spectrales. Elles enregistrent ces facteurs de manière simultanée et permettent de déduire les corrections nécessaires pour chaque pixel. Voici comment elles sont utilisées :

• Sensibilité spectrale du CCD $\sigma(\lambda)$ : Mémorise la réponse du CCD à différentes longueurs d'onde.

• Spectre de la source lumineuse $l_r(\lambda)$ : Capture l'intensité de la lumière émise par la source à travers chaque filtre.

• Distribution de l'énergie lumineuse $E(x, y, \lambda)$ : Enregistre l'homogénéité ou les variations de l'éclairage sur le plan de numérisation, sachant que la réflectance du panneau est uniforme mais proportionnelle à l'éclairement.

• Transmittance optique $o(x, y, \lambda)$ : Mémorise la perte de lumière à travers les éléments optiques en relation avec le plan de numérisation, ce qui permet de quantifier la quantité de lumière transmise au capteur.

• Transmittance des filtres $k(y, \lambda)$ : Capture la quantité de lumière passant à travers chaque filtre.

• Vignettage $v(x, y, \lambda)$ : Enregistre la diminution de l'intensité lumineuse en fonction de l'éloignement par rapport au centre optique.

• Correction de la non-uniformité de réponse des pixels (PRNU) $\xi(y)$ : Mémorise les variations de la réponse des pixels sous un éclairage uniforme.

*Figure 192 - numérisation des 13 fichiers blancs de référence sur un panneau de téflon uniforme.*

On voit donc, qu'avec ces deux opérations de numérisation des *dark* et des *flat*, tous les paramètres de corrections de l'équation générale ont été enregistrés, et étant donné que les images sont déjà étalonnées sur le blanc de référence (voir § 6.3.3, page-sup. - 36 -), les opérations suivantes permettent d'obtenir des images normalisées :

**Soustraction des *dark frames***

Les *dark frames* sont soustraits des images *flat* pour éliminer les bruits de mesure non liés à l'éclairage et calculés comme suit :

$$I_{flat\ corrigé}(x,y) = I_{flat}(x,y) - I_{dark}(x,y) \qquad \textit{Eq. ( 43 )}$$

Avec $I_{dark}(x,y)$ l'intensité du pixel dans le *dark frame* et $I_{flat}(x,y)$ est celle dans l'image *flat*.

**Normalisation du *flat***

Après la soustraction des *dark frames*, on recalcule chaque pixel, avec un coefficient de normalisation basé sur le pixel le plus lumineux de l'image *flat* corrigée. Le coefficient $C$ pour chaque pixel $(x,y)$ est calculé comme suit :

$$C(x,y) = \frac{1}{I_{flat\ corrigée}(x,y)} \qquad \textit{Eq. ( 44 )}$$

Ce calcul assure que chaque pixel pourra être normalisé individuellement, permettant une correction précise des variations pixel par pixel.

**Application du *flatfield* à l'image cible**

Avec le *flat* normalisé, on corrige chaque image cible :

$$I_{corrigée}(x,y) = I_{originale}(x,y) \times C(x,y) \times I_{flat\ normalisé}(x,y) \qquad \textit{Eq. ( 45 )}$$

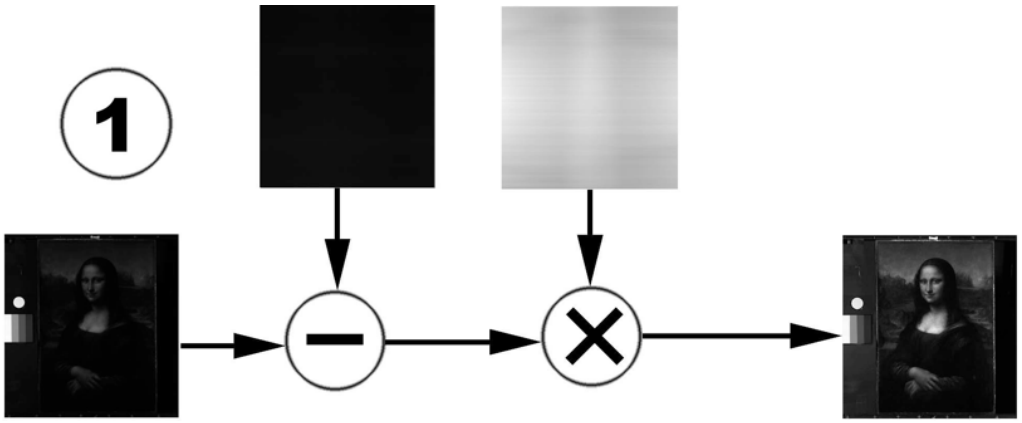



*Figure 193 - La normalisation des 13 images. Flatfield*

Cette approche méthodique, incluant la soustraction des *dark frames* et l'utilisation des *flats* normalisés, garantie la précision et l'uniformité des images numériques pour chaque pixel.

## 6.4 Numérisation et normalisation des images

### 6.4.1 Numérisation des tableaux

La configuration de la caméra étant mémorisée, on substitue le panneau de référence de blanc par le tableau qui est maintenu par les deux barres de maintien. On veillera à ce que les mires de repère et le blanc de référence situés sur les barres de maintien soient bien visibles. La numérisation des images avec les 13 filtres est automatique.

### 6.4.2 Correction de blanc

Un étalon blanc, constitué d'un disque en téflon de Ø 30 mm, est systématiquement numérisé dans les images afin de permettre des ajustements. Son spectre a été mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre. Contrairement aux images *flat* qui ne sont pas capturées avant chaque nouvelle numérisation de tableau, l'étalon blanc permet de compenser de petites variations inévitables de l'installation, telles que la baisse progressive de la puissance des lampes ou l'impact de la lumière ambiante. Cette correction, bien que mineure, permet de maintenir la précision des mesures lorsque la même configuration de la caméra et des projecteurs est utilisée pendant plusieurs semaines. Le facteur de correction calculé à partir du référentiel de blanc est appliqué uniformément à l'ensemble des pixels avant les étapes ultérieures de registration et de reconstruction spectrale.

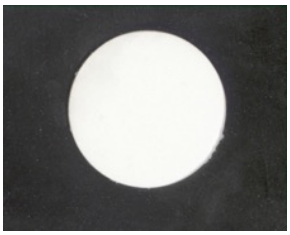


*Figure 194 - référent de blanc en téflon incorporé aux images numérisées*

### 6.4.3 Registration des images

Il a été observé précédemment que la distance focale de l'optique de la caméra varie selon la longueur d'onde, nécessitant ainsi un ajustement spécifique de la mise au point pour chaque filtre, ce qui entraîne des variations dans les échelles des images produites. Notamment, les images capturées dans les spectres ultraviolet et infrarouge présentent des dimensions plus grandes que celles obtenues dans les autres longueurs d'onde. Pour garantir que chaque pixel de l'image finale corresponde exactement aux 13 valeurs qui lui sont associées, un redimensionnement de chaque image (recalage ou registration) est requis.

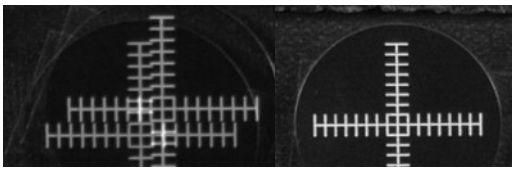


*Figure 195 - Différence d'échelle entre les filtres 560 nm et 1000 nm, les treize images corrigées et superposées*

Le processus de recalage des images s'effectue d'abord par une recherche automatique des centres des 4 mires situées aux quatre angles des images. Ces quatre coordonnées sont transmises à une fonction de transfert d'une précision telle qu'elle permet une superposition avec une marge d'erreur de plus ou moins un quart de pixel.

$$I'(x,y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} I(x-i, y-j) \cdot K(i,j) \qquad \textit{Eq. ( 46 )}$$

Avec : $I'(x,y)$ la valeur du pixel de l'image résultante à la position $(x,y)$.
$I(x,y)$ est la valeur du pixel de l'image originale à la position $(x,y)$.
$K(i,j)$ est la valeur du pixel du noyau de filtre à la position $(i,j)$.
Ou, dans le cas particulier d'une réduction linéaire simple, lorsque l'on utilise un filtre de sous-échantillonnage, tous les éléments du noyau ont la même valeur $c = \frac{1}{n^2}$ avec $n$ la taille du noyau. Dans ce contexte, l'équation de convolution se simplifie car il n'y a qu'un seul coefficient de pondération constant $c$. Elle devient alors :

$$I'(x,y) = c \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} I(x-i, y-j) \qquad \textit{Eq. ( 47 )}$$

La fonction de transfert est la méthode qui d'après nos tests préserve au mieux l'information par comparaison avec les méthodes d'interpolation linéaire ou bicubique.

Pour le redimensionnement des images on utilise comme points de repère des mires circulaires de haute précision et à fort contraste, disposées sur les barres de maintien des tableaux. Ces mires présentent l'avantage de maintenir un contraste constant de l'ultraviolet aux infrarouges, offrant ainsi une fiabilité supérieure par rapport aux méthodes de reconnaissance d'image (Cappellini et al., 2005), (Kern et Pattichis, 2007) basées sur des détails qui disparaissent dans la plupart des cas dans le spectre infrarouge ou dans les images de certains filtres.

## 6.5 Reconstruction des courbes spectrales de réflectance

**Les données du problème**
La valeur numérique d'un pixel pour les 13 canaux (filtres) d'une image multispectrale est le résultat de deux combinaisons :

- Une interaction entre une source lumineuse avec la réflectance de la surface d'un objet.
- La sensibilité spectrale du capteur combinée avec la transmittance de l'optique et du filtre sélectionné.

$$S = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot T(\lambda)\, d\lambda \qquad \textit{Eq. ( 48 )}$$

$T(\lambda)$ est la fonction de transmission du filtre à la longueur d'onde $\lambda$.

$I(\lambda)$ est l'intensité du spectre d'entrée à la longueur d'onde $\lambda$.

L'intégrale $S$ donne l'intensité totale de la lumière passant à travers le filtre dans la bande de longueurs d'onde spécifiée.

La caractérisation de la réponse d'un filtre passe-bande ne peut pas être définie de manière univoque simplement par une mesure de sortie unique. Théoriquement, une infinité de distributions spectrales d'entrée différentes peuvent traverser un filtre passe-bande et produire la même mesure de sortie (voir Figure 196). Cela soulève une problématique connue sous le nom de non-univocité de la réponse d'un filtre.

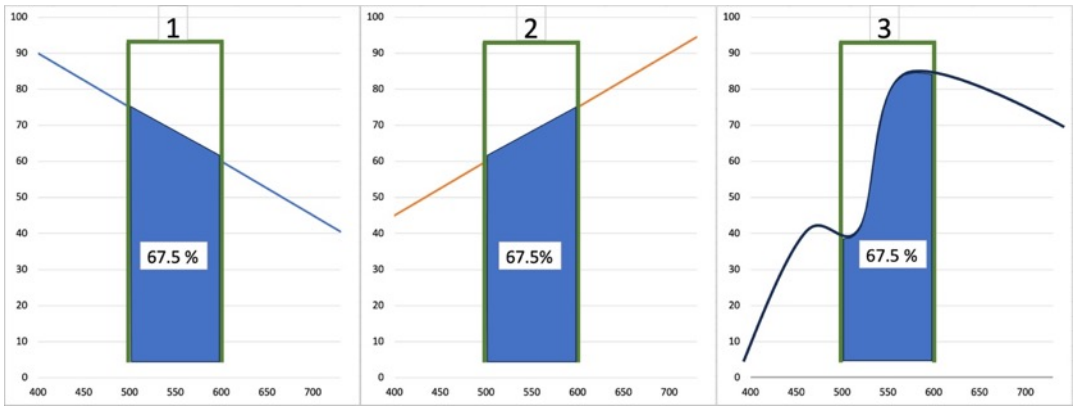


*Figure 196 - La bande passante d'un filtre peut donner trois réponses identiques pour trois courbes spectrales différentes.*

Dans le domaine de la numérisation d'œuvres d'art composées de pigments et de liants, il est observé que les spectres de réflectance de la matière picturale présentent des variations progressives, ce qui signifie que les changements dans les spectres se produisent de manière continue et sans transitions abruptes. Un pas de 40 nm est souvent suffisant pour échantillonner ces spectres de manière efficace. Ainsi, le cas numéro 3 de la Figure 196, qui présente deux changements de direction positifs et négatifs marqués, est peu probable. Cette propriété permet de réduire le nombre de filtres nécessaires pour capturer les spectres avec une précision adéquate (Maître et al., 1996), (Ribés Cortés, 2003, p.193). Toutefois, il existe des exceptions notables, telles que le minium ou le rouge de mercure, qui, lorsqu'ils sont présents à l'état pur (c'est-à-dire non mélangés avec d'autres pigments) et sans vernis protecteur, peuvent présenter des variations spectrales plus marquées, bien que ce soit rare et encore plus rarement deux variations. Par conséquent, il a été établi qu'une caméra multispectrale équipée de 10 filtres de 40 nm pour couvrir le spectre visible, complétée par 3 filtres pour le proche infrarouge jusqu'à 1100 nm, peut mesurer les spectres de réflectance avec une précision suffisante, comparable à celle

obtenue avec un spectrophotomètre spécialisé (Ribés Cortés, 2003). Comme le démontre la Figure 197, les spectres de réflectance mesurés avec un spectrophotomètre utilisant une sphère d'intégration.

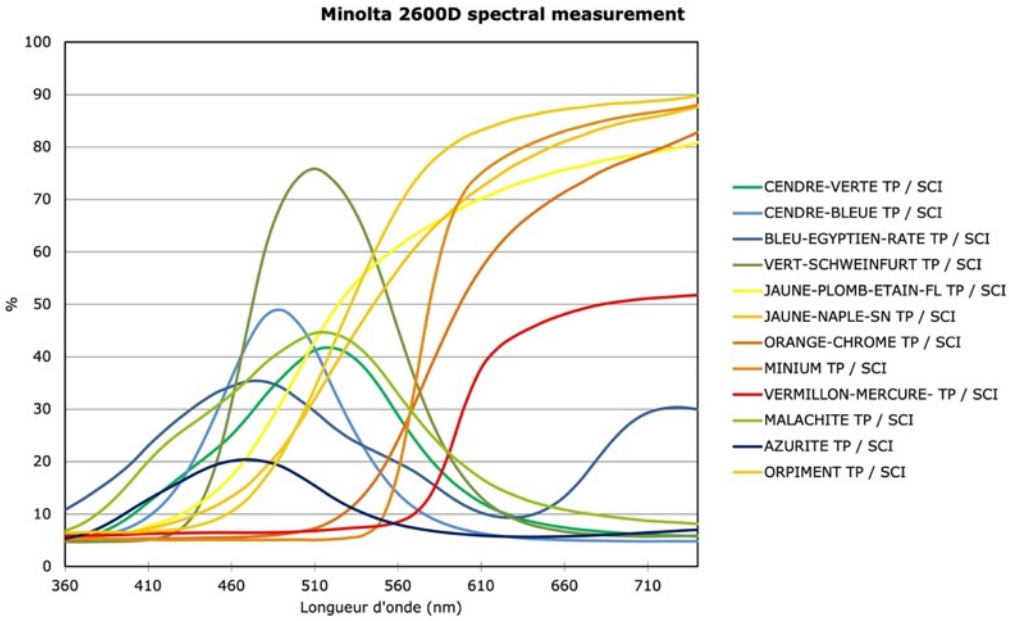



*Figure 197 - Quelques pigments caractéristiques utilisés par la plupart des Peintres. Spectres de réflectance mesurés avec un spectrophotomètre.*

### 6.5.1 État de l'art des méthodes de reconstruction de spectres à partir de données discrètes

La caméra fournit pour chaque pixel 13 mesures de 400 à 1000 nm, sur lesquelles il faut retrouver le spectre complet avec les 61 valeurs intermédiaires tous les 10 nm. La reconstruction de spectres à partir de données discrètes est une tâche centrale dans de nombreuses disciplines, notamment en physique, chimie, astronomie, et traitement du signal. Elle implique l'utilisation de diverses méthodes mathématiques et numériques qui peuvent être regroupées en plusieurs grandes familles, chacune ayant ses caractéristiques et applications spécifiques. Cet état de l'art recense les six principales familles de méthodes utilisées dans ce domaine.

**Transformée de Fourier et méthodes associées**
Ces méthodes exploitent la Transformée de Fourier pour analyser les données dans le domaine fréquentiel. La Transformée de Fourier Discrète (TFD) et ses variantes, comme la Transformée de Fourier Rapide Non Uniforme (NUFFT), sont utilisées pour reconstruire les spectres en passant du domaine temporel ou spatial au domaine fréquentiel. Ces techniques sont efficaces pour les signaux périodiques ou stationnaires comme par exemple *Modified Discrete Sine Transform* (MDST) (Keusen, 1995).

**Méthodes de déconvolution**
Les méthodes de déconvolution sont utilisées pour inverser l'effet d'une convolution causée par la réponse instrumentale ou un autre filtre. Par exemple, la Déconvolution de Wiener et les algorithmes itératifs comme Richardson-Lucy permettent de restaurer le spectre original en minimisant l'impact du bruit et des distorsions. Filtre de Wiener (Pratt et Mancill, 1976).

**Transformées en ondelettes**
Les transformées en ondelettes décomposent un signal en une série de fonctions ondelettes, qui sont localisées à la fois en temps et en fréquence (Mallat, 1989).

**Techniques d'apprentissage machine**

Les techniques d'apprentissage machine, et en particulier les réseaux de neurones, ont été utilisées dans le cadre du projet Crisatel, (Ribes, Schmit et Brettel, 2001), (Ribés Cortés, 2003, p.112), (Ribés et Schmit, 2002), (Ribés et al., 2004), (Ribes et Schmit, 2003), . Ces méthodes ont évolué, notamment avec l'apparition des réseaux de neurones profonds (Guest, Cranmer et Whiteson, 2018) (Kades et al., 2020), de plus en plus utilisés pour la reconstruction de spectres. Ces méthodes apprennent à partir de grandes quantités de données et sont capables de modéliser des relations complexes et non linéaires. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) (Li et al., 2017) ainsi que les autoencodeurs et les *Variational Autoencoders* (VAE) (Kingma et Welling, 2022) sont couramment utilisés[24] pour améliorer la précision des reconstructions, surpassant souvent les méthodes traditionnelles, surtout dans des contextes où les données sont partiellement manquantes ou fortement bruitées.

**Méthodes d'inversion et de régularisation dites indirectes**

Ces méthodes résolvent des problèmes inverses mal posés en imposant des contraintes supplémentaires, telles que le lissage ou la parcimonie. Au premier rang de celles-ci figure la méthode *pseudo-inverse de Moore-Penrose* (Moore, 1920), (Penrose, 1955), qui sera utilisée pour la reconstruction de spectres pour le dévernissage virtuel des œuvres (voir § 5.3.1, page 120). Ces méthodes sont les plus couramment utilisées pour la reconstruction de spectres à partir de caméras multispectrales, incluant : *Non Negative Least Squares* (Imai, Taplin et Day, 2002) ; *Non averaged pseudo-inverse* (Imai, Rosen et Berns, 2002) ; *Pseudo-inverse and SVD* (Burns, 1997) ; *Hardeberg's modified Pseudo-inverse* (Hardeberg, 1999) et *Smoothing inverse* (Pratt, 1978), (Ribes et Schmitt, 2008).

Ces méthodes tentent d'aligner les mesures indirectement obtenues avec les données originales, ce qui peut souvent entraîner des écarts par rapport aux valeurs mesurées directement avec la caméra. Cependant, des vérifications effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre ont montré que ces points se situent presque systématiquement sur les courbes des spectres obtenus par le spectrophotomètre (voir Figure 197). On préfèrera donc une méthode qui passe par ces points.

**Méthodes d'interpolation**

Les méthodes de reconstruction par interpolation se concentrent principalement sur la réponse de la caméra et ne nécessitent pas de mire colorée dans l'image ni de phase d'apprentissage. La caméra est considérée comme un échantillonneur de spectre, capturant un point de la courbe spectrale tous les 40 nm dans le visible et tous les 100 nm dans le proche infrarouge. Ces méthodes reconstruisent les spectres en reliant les points de données existants par des courbes lisses, permettant obtenir une définition du spectre tous les 10, 5 ou 1 nm. Parmi les méthodes les plus populaires figurent les *splines* cubiques (Farin, 1993), qui peuvent être considérées comme un modèle mathématique associant une représentation continue d'une courbe (ou surface) à un ensemble discret de points dans un espace donné. L'ajustement par *splines* est une approximation par morceaux, définie par une série de polynômes, souvent de degré 3 (cubiques), connectés de manière que la courbe soit continue et lisse aux points de jonction (appelés nœuds). Le principe de base est le suivant :

Entre chaque paire de points $x_i$ et $x_i + 1$, on définit un polynôme cubique $S_i(x)$ de la forme :

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \qquad \textit{Eq. ( 49 )}$$

Avec $a_i$, $b_i$, $c_i$ et $d_i$ étant des coefficients déterminés par les conditions d'interpolation et de lissage.

[24] Les autoencodeurs sont des réseaux de neurones qui apprennent une représentation compressée des données, tandis que les variational autoencoders (VAE) ajoutent une composante probabiliste pour modéliser la distribution sous-jacente des données et générer de nouvelles données similaires.

Pour garantir que la courbe est lisse, on impose des conditions de continuité non seulement sur la courbe elle-même, mais aussi sur ses premières et deuxièmes dérivées. Cela assure une transition douce et continue aux points de jonction.

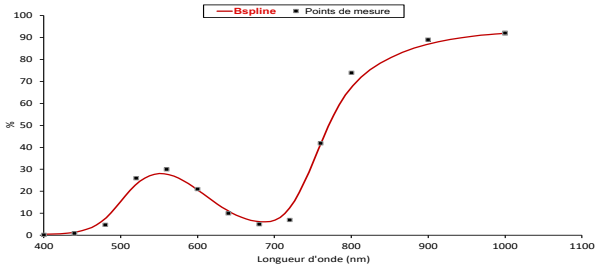



*Figure 198 - Reconstruction d'un spectre par une Bspline calculé sur 13 mesures données par la caméra multispectrale. La courbe ne passe pas systématiquement par les points de mesure.*

Comme pour les méthodes indirectes, et comme on peut le constater (voir Figure 198), ces méthodes rencontrent le problème récurrent de leur incapacité à préserver fidèlement les points de mesure obtenus via les filtres de la caméra. Elles peuvent échouer à reproduire exactement les valeurs mesurées ou à préserver des caractéristiques critiques telles que les maxima et minima locaux. L'interpolation linéaire, quant à elle, garantit le passage par les points de mesure spécifiques, mais elle ne parvient pas à modéliser les nuances plus fines du spectre entre ces points.

### 6.5.2 La méthode PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*)

Contrairement aux méthodes classiques d'interpolation, des techniques spécifiques comme PCHIP (Fritsch et Carlson, 1980), (Han et Yang, 2020) sont conçues pour surmonter les limitations des autres méthodes, en garantissant que l'interpolation passe toujours par les points de données mesurés. Cela en fait une solution potentiellement plus précise pour la reconstruction de spectres dans des contextes où la fidélité des points mesurés est primordiale.

La méthode PCHIP appartient à la famille des méthodes géométriques. Elle est conçue pour produire une interpolation cubique par morceaux en utilisant les polynômes d'Hermite, calculés de manière que la courbe interpolée soit non seulement continue, mais aussi lisse, et que la monotonie soit conservée lorsque les données originales le sont.

PCHIP garantit que la courbe résultante est continue et dérivable, offrant ainsi une transition fluide entre les points de données sous-échantillonnés, tout en évitant les oscillations indésirables souvent observées avec d'autres méthodes d'interpolation.

Cette méthode est donc particulièrement adaptée pour les situations où il est nécessaire de reconstruire un spectre ou d'autres types de signaux à partir de sous-échantillons tout en conservant fidèlement les caractéristiques originales des données.

Pour un ensemble donné de points de données $(x_i, y_i)$ où $i = 0, 1, 2, \dots, n$ , PCHIP crée une interpolation cubique par morceaux entre chaque paire de points consécutifs $(x_{i-1}, y_{i-1})$ et $(x_i, y_i)$. Pour chaque intervalle $[x_{i-1}, x_i]$, un polynôme cubique $p_i(x)$ est défini.

Chaque polynôme $p_i(x)$ dans l'intervalle $[x_{i-1}, x_i]$ est de la forme générale :

$$p_i(x) = c_{0,i} + c_{1,i}(x - x_{i-1}) + c_{2,i}(x - x_{i-1})^2 + c_{3,i}(x - x_{i-1})^3 \qquad \textit{Eq. ( 50 )}$$

Les coefficients $c_{0,i}$, $c_{1,i}$, $c_{2,i}$ et $c_{3,i}$ sont calculés pour s'assurer de la continuité, de la dérivabilité et de la monotonie.

Les dérivées aux extrémités de chaque segment, $m_i = p'_i(x_i)$, sont choisies de manière à garantir la continuité et la douceur des courbes, tout en préservant la forme des données. Pour garantir la monotonie, les dérivées $m_i$ sont calculées en utilisant des formules qui prennent en compte les différences de pente entre les points successifs, afin d'éviter les oscillations non désirées qui pourraient entraîner une violation de la monotonie des données.

Les dérivées aux nœuds, $m_i$, sont typiquement calculées de manière à éviter les changements de signe dans les dérivées estimées, qui pourraient entraîner des inflexions indésirables. Une formule couramment utilisée pour calculer les dérivées aux nœuds $m_i$ dans PCHIP est :

$$m_i = \frac{3(h_{i-1} + h_i)}{2(h_{i-1} + h_i) - h_i d_{i-1} - h_{i-1} d_i} \qquad \textit{Eq. ( 51 )}$$

Avec $h_i = x_i - x_{i-1}$ et $d_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}$.

PCHIP est une méthode rigoureuse conçue pour fournir des interpolations de haute qualité qui respectent les propriétés essentielles des données originales fournies par la caméra et la méthode de normalisation.

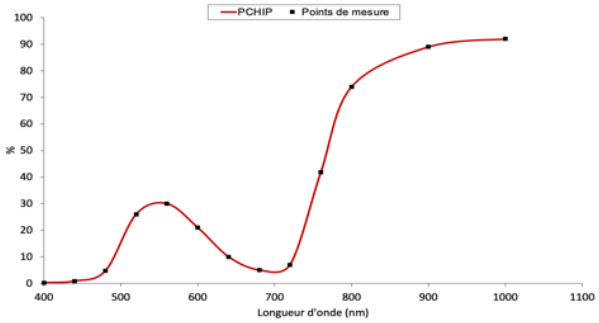



*Figure 199 - Spectre interpolé avec la méthode PCHIP*

**Qualification et validation de la méthode PCHIP**

Pour évaluer la précision de la caméra multispectrale et la méthode PCHIP pour la reconstruction des spectres, une comparaison a été réalisée entre les spectres reconstruits et ceux mesurés à chaque nanomètre par un spectrophotomètre équipé d'une sphère d'intégration, le modèle Minolta D3600. Afin d'éviter toute interaction des pigments avec les rayons ultraviolets, qui peuvent induire des réactions photochimiques, les mesures ont été effectuées en l'absence de lumière UV. Pour quantifier les différences entre les spectres mesurés et ceux reconstruits, deux méthodes statistiques sont couramment employées (Imai, Rosen et Berns, 2002) : le RMSE (*Root Mean Square Error*) et le GFC (*Goodness of Fit Coefficient*)(Hernández-Andrés et al., 2001).

**Le RMSE**

Le RMSE, ou erreur quadratique moyenne, est une mesure de la différence entre les valeurs prédites par un modèle ou un estimateur et les valeurs observées. Cette méthode est couramment utilisée pour évaluer la précision des prédictions numériques et est calculée selon la formule RMS, Erreur quadratique moyenne :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad \textit{Eq. ( 52 )}$$

où $y_i$ représente les valeurs mesurées, $\hat{y}_i$ les valeurs reconstruites et $n$ le nombre total de points mesurés. Le RMSE offre une mesure précise de la variabilité des erreurs, où des valeurs proches de zéro indiquent une reconstruction de haute précision. Cependant, l'application et l'interprétation du RMSE dépendent significativement du contexte spécifique et du type de données analysées. Dans le domaine de la spectrophotométrie, particulièrement en ce qui concerne les mesures quantitatives appliquées à la colorimétrie, il est généralement admis qu'un RMSE moyen inférieur à 1 indique une performance excellente. Cette norme permet d'évaluer la qualité des reconstructions spectrales en fonction de critères adaptés à la spécificité des applications envisagées.

**Le GFC**

Le GFC, quant à lui, est basé sur l'inégalité de Schwartz (aussi connue sous le nom d'inégalité de Cauchy-Schwarz) et mesure la corrélation entre les ensembles de données. Il est défini par l'équation GFC suivante :

$$GFC = \frac{\left|\sum_j R_m(\lambda_j) \cdot R_e(\lambda_j)\right|}{\sqrt{\left|\sum_j \left[R_m(\lambda_j)\right]^2\right|} \cdot \sqrt{\left|\sum_j \left[R_e(\lambda_j)\right]^2\right|}} \qquad \textit{Eq. ( 53 )}$$

Avec $R_m(\lambda_j)$ la mesure originale à la longueur d'onde $\lambda_j$ et $R_e(\lambda_j)$ la valeur estimée. Cette formule produit une valeur entre 0 et 1, où 1 indique une correspondance parfaite entre les deux ensembles de données, et une valeur proche de 0 indique une faible correspondance. GFC ≥ 0.999 donne une très bonne correspondance de spectre et GFC ≥ 0.9999 une excellente correspondance. Le GFC est particulièrement utile pour évaluer la similarité en termes de forme des courbes spectrales mesurées par rapport à celles reconstruites.

Ces deux mesures, le RMS et le GFC, fournissent une évaluation robuste (Imai, Rosen et Berns, 2002) et complémentaire de la fidélité des spectres reconstruits par rapport aux spectres originaux mesurés, permettant ainsi une validation efficace de la méthode de reconstruction PCHIP dans notre étude.

| GFC | | RMSE | |
|---|---|---|---|
| B4 Craie 4 | 0,99997 | B5 Craie 5 | 0,788 |
| B7 Orpiment 4 | 0,99974 | B8 Orpiment 5 | 1,092 |
| A12 Minium 3 | 0,99900 | B11 Minium 5 | 1,791 |
| A15 Vermillon 3 | 0,99955 | B14 Vermillon 5 | 0,417 |
| D1 Blanc de Plomb 4 | 0,99998 | D2 Blanc de Plomb 5 | 0,892 |
| C6 Jaune de Plomb-étain II 3 | 0,99997 | D5 Jaune de Plomb-étain II 5 | 1,824 |
| C9 Jaune de Naples foncé 3 | 0,99965 | D8 Jaune de Naples foncé 5 | 1,010 |
| C15 Laque de garance 3 | 0,99978 | D14 Laque de garance 5 | 0,584 |
| E3 Jaune de Plomb-étain I 3 | 0,99995 | F3 Jaune de Plomb-étain I 6 | 1,399 |
| E6 Gomme-gutte 3 | 0,99992 | F5 Gomme-gutte 5 | 0,775 |
| E9 Laque de Nerprun 3 | 0,99968 | F8 Laque de Nerprun 5 | 0,760 |
| E12 Sang-dragon 3 | 0,99984 | F11 Sang-dragon 5 | 0,484 |
| C15 Laque de garance II 3 | 0,99987 | F14 Laque de garance II 5 | 0,549 |
| G3 Jaune de Naples clair 3 | 0,99989 | H2 Jaune de Naples clair 5 | 1,587 |
| G6 Ocre jaune 3 | 0,99973 | H5 Ocre jaune 5 | 1,288 |
| G9 Limonite 3 | 0,99981 | H8 Limonite 5 | 1,504 |
| G12 Ocre rouge 3 | 0,99990 | H11 Ocre rouge 5 | 0,473 |
| G15 Carmin de cochenille 3 | 0,99976 | H14 Carmin de cochenille 5 | 0,726 |
| I3 Laque de gaude 3 | 0,99984 | J2 Laque de gaude 5 | 0,649 |
| I6 Stil-de-grain brun 3 | 0,99991 | J5 Stil-de-grain brun 5 | 0,840 |
| I9 Bitume 3 | 0,99995 | J8 Bitume 5 | 0,281 |
| I12 Hématite 3 | 0,99985 | J11 Hématite 5 | 0,208 |
| I15 Laque de bois du Brésil 3 | 0,99983 | J14 Laque de bois du Brésil 5 | 0,670 |
| K3 Terre verte de Bohème 3 | 0,99995 | L2 Terre verte de Bohème 5 | 0,864 |
| K6 Terre d'ombre naturelle 3 | 0,99997 | L5 Terre d'ombre naturelle 5 | 0,563 |
| K9 Terre de Cassel 3 | 0,99997 | L8 Terre de Cassel 5 | 0,816 |
| K12 Terre d'ombre brûlée 3 | 0,99993 | L11 Terre d'ombre brûlée 5 | 0,685 |
| K15 Lac-Laque 3 | 0,99982 | L14 Lac-Laque 5 | 0,397 |
| M3 Malachite 3 | 0,99986 | N2 Malachite 5 | 1,381 |
| M6 Terre verte de Vérone 3 | 0,99998 | N5 Terre verte de Vérone 5 | 0,905 |
| M9 Indigo naturel 3 | 0,99974 | N8 Indigo naturel 5 | 0,417 |
| M12 Smalt 3 | 0,99965 | N11 Smalt 5 | 1,004 |
| M15 Outremer naturel (Lapis Lazuli) 3 | 0,99993 | N14 Outremer naturel (Lapis Lazuli) 5 | 0,490 |
| O3 Résinate de cuivre 3 | 0,99991 | P2 Résinate de cuivre 5 | 0,713 |
| O6 Bleu égyptien 3 | 0,99988 | P5 Bleu égyptien 5 | 0,215 |
| O9 Azurite 3 | 0,99989 | P8 Azurite 5 | 1,001 |
| O12 Noir de noyaux 3 | 0,99998 | P11 Noir de noyaux 5 | 0,347 |
| O15 Noir d'ivoire 3 | 0,99998 | P14 Noir d'ivoire 5 | 0,433 |
| Q3 Cendres vertes 3 | 0,99986 | R2 Cendres vertes 5 | 0,880 |
| Q6 Vert-de-gris 3 | 0,99950 | R5 Vert-de-gris 5 | 0,515 |
| Q9 Cendres bleues 3 | 0,99978 | R8 Cendres bleues 5 | 0,646 |
| Q12 Noir de fumée 3 | 0,99998 | R11 Noir de fumée 5 | 0,356 |
| **Moyenne** | **0,99983** | **Moyenne** | **0,791** |

*Tableau 21 - Synthèse des calculs GFC et RMSE - Comparaison des spectres mesurés avec la caméra multispectrale et reconstruits avec la méthode PCHIP avec les spectres mesurés avec le spectrophotomètre Minolta D3600.*

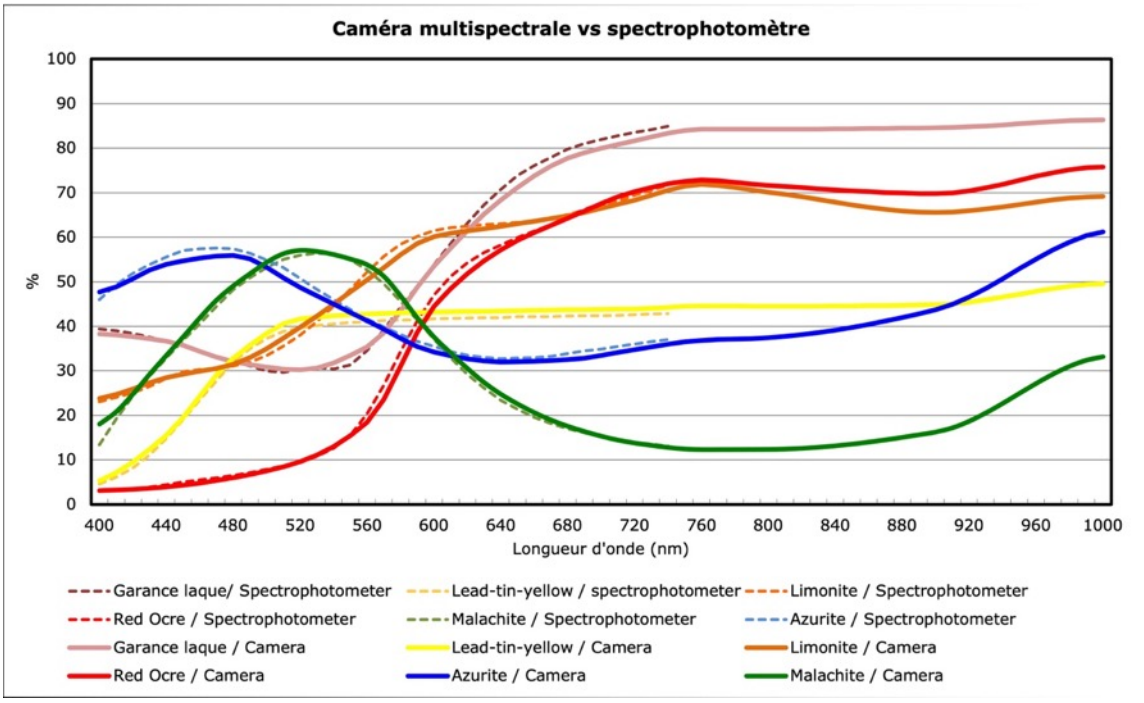



*Figure 200 - Spectres mesurés avec la caméra multispectrale et reconstruits avec la méthode PCHIP en comparaison avec les mesures au spectrophotomètre Minolta D2600.*

**En résumé :**
L'évaluation complète de la caméra multispectrale, incluant un dispositif d'éclairage innovant, des logiciels de calibrage, de normalisation, de registration et de reconstruction des spectres de réflectance, a été réalisée avec succès à l'aide d'une mire de pigments. La comparaison des spectres obtenus par numérisation avec ceux mesurés par un spectrophotomètre Minolta D3600 a validé l'efficacité du système. Les analyses quantitatives, utilisant le GFC (avec une moyenne de 0.99983) et le RMSE (avec une moyenne de 0.791), démontrent une reproduction fidèle des spectres de réflectance. Ces résultats confirment la précision et la fiabilité du système de caméra multispectrale, soulignant son potentiel pour des applications exigeantes en imagerie spectrale.

## 6.6 La reconstruction des images couleur

Ayant établi que la caméra multispectrale produit des mesures spectrales fiables pour la numérisation et l'analyse des peintures de chevalet, il devient impératif de convertir ces données spectrales en couleurs perceptibles par l'œil humain pour leur représentation sur des écrans ou leur reproduction imprimée. Cette transformation soulève la question délicate de l'identification des "vraies" couleurs de l'œuvre, une interrogation complexifiée par le fait que la perception des couleurs varie significativement selon l'éclairage sous lequel elles sont exposées. Par exemple, l'éclairage d'une œuvre à la lumière d'une bougie induira une perception colorimétrique différente de celle obtenue sous une lampe à incandescence ou à la lumière naturelle du soleil.

Pour traiter cette question, il sera examiné les méthodologies employées pour transposer les données spectrales en valeurs CIE-LAB, un espace colorimétrique conçu pour émuler la sensibilité chromatique de l'œil humain et offrir une mesure uniforme des couleurs. Cette étape est fondamentale pour garantir que les couleurs rendues reflètent fidèlement celles de l'œuvre originale, telles qu'elles apparaîtraient sous un éclairage standardisé D65.

Les calculs réalisés pour évaluer la fidélité des couleurs restituées seront également détaillés, en les comparant à celles d'une mire de référence mesurée préalablement avec un spectrophotomètre. Cette démarche permet de quantifier la précision de la restitution des couleurs, un aspect essentiel tant pour la préservation des œuvres d'art que pour leur étude exhaustive. Ce processus dépasse la simple reproduction des couleurs pour inclure une analyse approfondie des interactions entre la lumière, la matière et la perception humaine, essentielles à l'interprétation fidèle et à la conservation des œuvres d'art.

### 6.6.1 Le système CIE 1931 XYZ

Le système CIE 1931 $XYZ$ est un modèle colorimétrique développé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en 1931, qui a joué un rôle fondamental dans le domaine de la science des couleurs. Ce modèle est basé sur la théorie de la trichromie et représente une première tentative standardisée pour quantifier la manière dont les couleurs sont perçues par l'œil humain. Le modèle utilise des fonctions de correspondance colorimétrique pour définir mathématiquement la couleur en termes de trois valeurs, appelés $X$, $Y$, et $Z$.

Le système CIE 1931 s'appuie sur des expériences de vision humaine pour définir trois fonctions de correspondance colorimétrique, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, et $\bar{z}(\lambda)$ représentent différentes longueurs d'onde de la lumière visible. Ces fonctions ont été obtenues en demandant à des observateurs de faire correspondre les couleurs en utilisant différents mélanges de trois sources lumineuses primaires. Les fonctions résultantes sont des moyennes standardisées basées sur les réponses d'un groupe d'observateurs "standard".

Les coordonnées $XYZ$ dans l'espace colorimétrique sont calculées à partir des intensités lumineuses à différentes longueurs d'onde en utilisant les fonctions de correspondance colorimétrique. Pour un stimulus donné, les valeurs $XYZ$ tristimulus sont calculées par les intégrales suivantes où $S(\lambda)$ est la fonction de puissance spectrale de la source lumineuse :

$$X = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ \bar{x}\ (\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ \overline{y}\ (\lambda) d(\lambda) \qquad \textit{Eq. ( 54 )}$$

$$Z = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ \bar{z}\ (\lambda) d(\lambda)$$

Avec $k$ un facteur de normalisation défini comme :

$$k = \frac{100}{\int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ \overline{y}\ (\lambda) d(\lambda)} \qquad \textit{Eq. ( 55 )}$$

Cette normalisation garantit que pour une source lumineuse blanche, la valeur de $Y$ (qui correspond à la luminance perçue) sera 100, reflétant ainsi une échelle relative de luminance.

L'espace couleur $XYZ$ est conçu pour être indépendant du dispositif, ce qui signifie qu'il ne dépend pas des caractéristiques spécifiques des dispositifs de capture ou de reproduction des couleurs comme les moniteurs ou les imprimantes. Cela en fait un outil précieux pour la standardisation dans l'industrie de la couleur.

On introduit la réflectance spectrale de l'objet observée $R(\lambda)$ en considérant qu'elle modifie la puissance spectrale de la source lumineuse : $S(\lambda)$

Les valeurs CIE $X$, $Y$, et $Z$ tristimulus pour la couleur perçue d'un objet sous une source de lumière donnée peuvent alors être recalculées en tenant compte de la réflectance spectrale de l'objet. Les équations modifiées prennent la forme suivante :

$$X = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ R(\lambda) \bar{x}\ (\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ R(\lambda)\ \overline{y}\ (\lambda) d(\lambda) \qquad \textit{Eq. ( 56 )}$$

$$Z = k \int_{380\ nm}^{780\ nm} S(\lambda)\ R(\lambda) \bar{z}\ (\lambda) d(\lambda)$$

$S(\lambda)$ est la puissance spectrale de la lumière émise par la source lumineuse à la longueur d'onde $\lambda$.

$R(\lambda)$ est la réflectance spectrale de l'objet à la longueur d'onde $\lambda$.

$\bar{x}(\lambda)$, $\overline{y}(\lambda)$, et $\bar{z}(\lambda)$ sont les fonctions de correspondance colorimétrique standard de la CIE.

$k$ est un facteur de normalisation qui garantit que pour un blanc parfait, la valeur de $Y$ sera égale à 100, reflétant ainsi la luminance perçue maximale sous un éclairage standardisé.

### 6.6.2 Les illuminants

Les illuminants définis par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) sont des standards utilisés pour représenter différentes sources de lumière théoriques, permettant de caractériser la manière dont les couleurs sont perçues sous diverses conditions d'éclairage. Ces illuminants sont importants pour assurer la cohérence et la comparabilité des mesures de couleur dans différents environnements et applications. Par exemple, lors de l'évaluation de la couleur d'un tissu, l'utilisation d'un illuminant standard tel que le CIE D65 aide à déterminer comment la couleur apparaîtra sous une lumière du jour typique.

L'illuminant CIE D65, l'un des plus couramment utilisés en colorimétrie, représente une lumière du jour avec une température de couleur corrélée d'environ 6504 K, correspondant à la lumière naturelle du soleil à la mi-journée sous un ciel légèrement nuageux. Ce standard est essentiel pour les systèmes de reproduction des couleurs, comme l'affichage sur les écrans et l'impression, où une standardisation de la lumière est nécessaire pour assurer la cohérence des couleurs.

Le D65 est défini par une distribution spectrale d'énergie relative qui couvre les longueurs d'onde de 300 nm à 830 nm, imitant la lumière naturelle du jour en tenant compte des variations spectrales tout au long de la journée. Cette distribution permet de simuler une lumière du jour modérément chaude, ce qui le rend idéal pour une large gamme d'applications nécessitant une représentation fidèle des couleurs.

Dans les calculs colorimétriques, les valeurs tristimulus ($XYZ$) sont souvent calculées en utilisant D65 comme source de lumière standard. Ces calculs permettent de quantifier la manière dont une couleur sera perçue sous un éclairage D65, garantissant des résultats comparables et reproductibles dans différentes conditions de visualisation. De plus, le D65 sert de base pour l'espace colorimétrique sRGB, utilisé dans la majorité des écrans et appareils numériques.

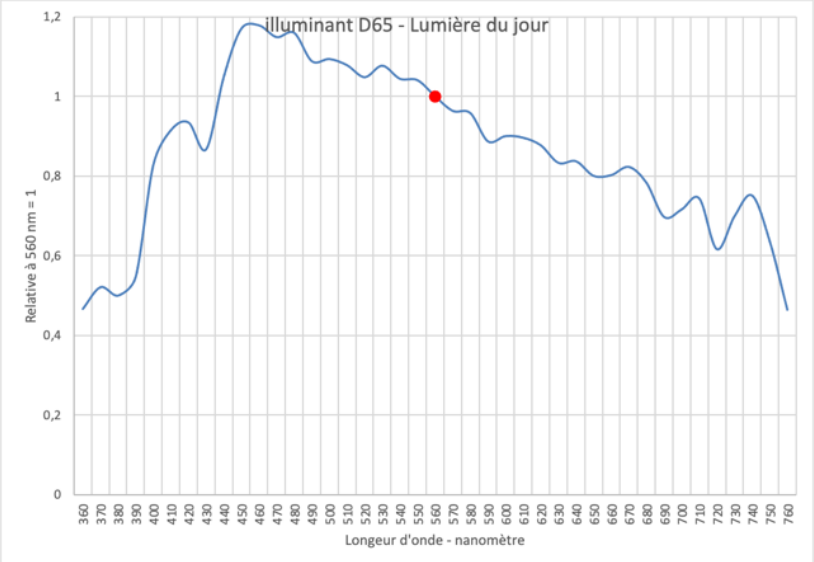



*Figure 201 - Illuminant D65, Lumière du jour - 560 nm est égal à 1 par définition. Domaine visible 360 à 760 nm.*

Dans le système C.I.E., d'autres illuminants ont été normalisés pour représenter différentes conditions d'éclairage. L'illuminant CIE A, par exemple, simule la lumière émise par une lampe à incandescence

avec une température de couleur d'environ 2856 K, souvent utilisé pour des applications intérieures sous éclairage artificiel. Les illuminants de la série B et C, basés respectivement sur la lumière du jour directe et moyenne, ne sont plus largement utilisés aujourd'hui. L'illuminant théorique CIE E représente une lumière blanche parfaite avec une distribution spectrale uniforme, bien qu'il soit également rarement utilisé. Dans la série D, l'illuminant CIE D50 est couramment employé en imprimerie et photographie pour simuler une lumière du jour à 5000 K. Les illuminants de la série FL, comme CIE FL2 et FL11, sont normalisés pour représenter les différentes lampes fluorescentes, souvent utilisées pour tester la réponse des couleurs sous un éclairage fluorescent. Les illuminants HP, tels que CIE HP3 et HP5, modélisent les lampes à décharge à haute pression, comme les lampes aux halogénures métalliques. Enfin, les illuminants ID, tels que ID50 et ID65, sont conçus pour simuler la lumière naturelle en intérieur, tandis que la publication CIE 15:2018 a introduit neuf illuminants spécifiques aux sources LED, reflétant les avancées technologiques dans les systèmes d'éclairage.

### 6.6.3 L'espace couleur CIE 1976 L*a*b et le modèle d'apparence couleur

L'espace couleur CIE 1976 $Lab^*$, souvent appelé CIE-LAB, est un modèle d'apparence colorée développé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) pour servir de système de couleur perceptuellement uniforme. Cela signifie que la même quantité de changement numérique dans ces valeurs de couleur est censée correspondre à un changement perceptuel visuellement similaire, indépendamment de la localisation dans l'espace couleur. Ce modèle est largement utilisé dans les industries où il est capital de mesurer et de reproduire précisément les couleurs, telles que l'impression, la peinture, et le textile.

**Définition de l'Espace CIE-LAB**
L'espace CIE-LAB est basé sur une représentation non linéaire de l'espace colorimétrique $XYZ$ CIE 1931. Il est conçu pour être plus représentatif de la perception humaine, où les axes $L^*$, $a^*$, et $b^*$ correspondent à des composantes psychologiquement uniformes :

$L^*$ : représente la luminosité perceptive de la couleur, où 0 signifie noir et 100 représente un blanc diffus.
$a^*$ : axe des couleurs vert-rouge, où les valeurs négatives indiquent le vert et les valeurs positives indiquent le rouge.
$b^*$ : axe des couleurs bleu-jaune, où les valeurs négatives indiquent le bleu et les valeurs positives indiquent le jaune.

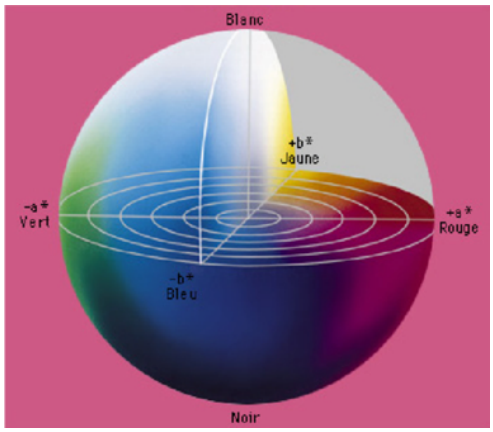



*Figure 202 - Espace CIE-LAB*

La transformation des valeurs $XYZ$ en $Lab^*$ est réalisée en plusieurs étapes, en utilisant les valeurs CIE 1931 tristimulus $XYZ$ adaptées à un point blanc de référence (typiquement D65 pour la lumière du jour), ce qui inclut une correction d'adaptation chromatique pour correspondre à la perception humaine des couleurs sous cet illuminant. Les équations de conversion sont les suivantes :

**Normalisation des valeurs $XYZ$ par rapport au point blanc :**

$X_n = X/X_w, \quad Y_n = Y/Y_w, \quad Z_n = Z/Z_w$

avec $X_w$, $Y_w$, $Z_w$ les composantes du point blanc.

Application d'une fonction de correction non linéaire :

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3} & si\ x > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 x + \frac{4}{29} & sinon \end{cases} \qquad \textit{Eq. ( 57 )}$$

Avec $x$ = $X_n$, $Y_n$ ou $Z_n$.

**Calcul des valeurs $L^*$, $a^*$, et $b^*$**

$L^* = 116f(Y_n) - 16$

$a^* = 500[f(X_n) - f(Y_n)]$

$$b^* = 200[f(Y_n) - f(Z_n)] \qquad \textit{Eq. ( 58 )}$$

Ces valeurs représentent les coordonnées cartésiennes dans l'espace $Lab^*$. À partir de ces coordonnées, on peut déduire les coordonnées cylindriques $LCh^*$: la chroma $C^*_{ab}$ et la teinte (hue) $h^*_{ab}$.

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \qquad \textit{Eq. ( 59 )}$$

$$h^*_{ab} = arctan(b^*/a^*) \qquad \textit{Eq. ( 60 )}$$

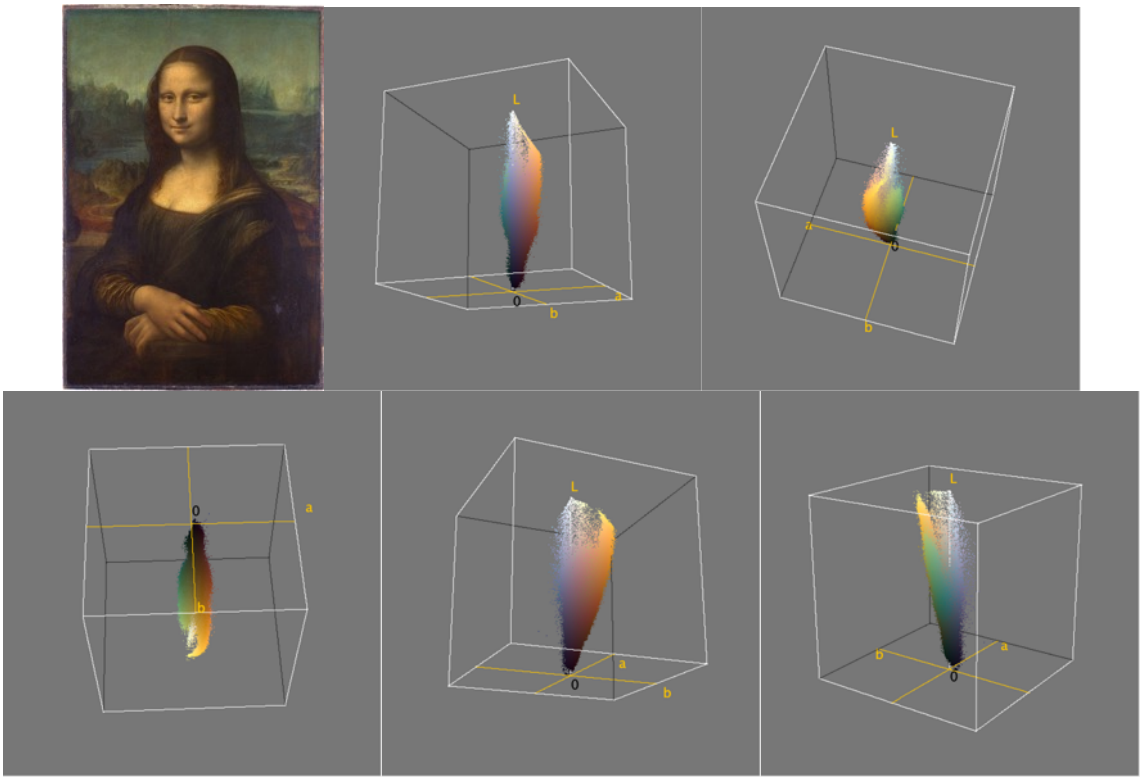


*Figure 203 - Représentation 3D de l'espace CIE-LAB de* La Joconde *(D65)*

Figure 203 chaque point ou pixel de l'image correspond à une couleur unique représentée dans l'espace CIE-lab. Dans cette visualisation en 3D, les coordonnées $L^*$, $a^*$, et $b^*$ déterminent la position de chaque couleur dans l'espace.

Ainsi, pour chaque pixel de l'image originale, il existe un point correspondant dans cet espace tridimensionnel, illustrant visuellement la distribution des couleurs en termes de luminosité, de chrominance rouge-vert ($a^*$) et bleu-jaune ($b^*$). Les cinq vues différentes permettent de comprendre la répartition des couleurs sous différents angles, offrant une perspective complète sur la diversité et la relation des couleurs dans l'image de *La Joconde*.

**Calculs des écarts de couleurs**

Au-delà des fonctions de l'adaptation chromatique, le modèle CIE LAB de 1976 offre un outil pour estimer la différence perceptuelle entre deux couleurs, exprimées par les coordonnées $L_1^*$, $a_1^*$, $b_1^*$ et $L_2^*$, $a_2^*$, $b_2^*$. Cette mesure, notée $\Delta E_{ab}^*$, est calculée comme la distance euclidienne entre deux points représentant les couleurs comparées, conformément à l'équation suivante :

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \qquad \textit{Eq. ( 61 )}$$

Avec $\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$, $\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$, $\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$

La différence juste perceptible (JND, pour "*Just Noticeable Difference*"), qui représente la valeur en dessous de laquelle la majorité des individus perçoivent deux couleurs comme identiques, a été établie autour de 2.2 pour un observateur non entraîné.

| $\Delta E_{ab}^*$ | Évaluations |
|---|---|
| < 2.2 | Imperceptible |
| 2.2 < 3 | Très difficilement perceptible |
| 3 < 6 | Perceptible mais acceptable |
| > 6 | Inacceptable |

*Tableau 22 - Évaluations des écarts de couleurs*

Il est important de noter que l'espace CIE-lab, bien qu'utile pour évaluer les différences de couleur, présente des défauts d'uniformité. Cela signifie qu'un même écart $\Delta E$ ne correspond pas nécessairement à la même différence de couleur perçue dans tout l'espace. $\Delta E_{2000}$ corrige en partie ces défauts en tenant compte de la non-uniformité perceptuelle dans l'espace CIE-lab, offrant ainsi une estimation plus précise des différences de couleur perceptuelles. Ces métriques plus raffinées, telles que $\Delta E_{94}$ et $\Delta E_{2000}$ existent pour des estimations plus précises, elles sont développées ci-après.

**Résultats**

Le tableau de pigments du XVII$^{e}$ siècle (voir Figure 111, page 133) a été mesuré avec le spectrophotomètre Minolta D3600, puis par la caméra multispectrale. Les spectres de réflectance capturés avec la caméra multispectrale ont été reconstruits grâce à la méthode d'interpolation PCHIP. Pour chaque technique de mesure, les coordonnées CIE-LAB ont été calculées sous un éclairage standard D65. Les écarts de couleur, mesurés par les valeurs $\Delta E_{ab}^*$, ont ensuite été calculés, démontrant une remarquable correspondance entre les deux méthodes et confirmant l'exactitude de la caméra multispectrale dans la reproduction des couleurs des pigments historiques.

| Nom | L*(D65) | a*(D65) | b*(D65) | (L-L)^2 | (a-a)^2 | (b-b)^2 | Delta E | Delta ab |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B4 Craie | 92,04 | -0,58 | 5,3 | 1,09 | 0,13 | 0,00 | **1,11** | **0,37** |
| B11 Minium | 36,5 | 21,4 | 43,1 | 2,03 | 0,00 | 0,96 | **1,73** | **0,98** |
| D1 Blanc de Plomb | 93,72 | -0,43 | 2,79 | 2,18 | 0,09 | 0,15 | **1,55** | **0,49** |
| C6 Jaune de Plomb-étain II | 84,16 | -2,05 | 21,66 | 0,00 | 0,07 | 0,05 | **0,35** | **0,35** |
| D7 Jaune de Naples foncé | 86,55 | -4,24 | 63,09 | 0,00 | 0,23 | 2,17 | **1,55** | **1,55** |
| F4 Gomme-gutte | 90,25 | -13,08 | 58,92 | 0,58 | 0,92 | 0,53 | **1,43** | **1,21** |
| F7 Laque de Nerprun | 85,05 | -5,8 | 54,57 | 0,01 | 0,62 | 1,25 | **1,37** | **1,37** |
| F13 Laque de garance II | 54,2 | 47,19 | 23,26 | 0,24 | 2,02 | 1,09 | **1,83** | **1,76** |
| H4 Ocre jaune | 79,87 | 6,3 | 53,99 | 0,53 | 0,00 | 0,58 | **1,05** | **0,76** |
| G9 Limonite | 75,73 | 8,41 | 24,97 | 0,09 | 1,80 | 0,53 | **1,55** | **1,53** |
| H10 Ocre rouge | 56,56 | 34,54 | 49,8 | 1,67 | 0,51 | 0,13 | **1,52** | **0,80** |
| J1 Laque de gaude | 87,78 | -10,58 | 61,65 | 2,85 | 1,01 | 0,01 | **1,97** | **1,01** |
| J7 Bitume | 58,39 | 6,5 | 31,55 | 2,28 | 0,39 | 0,01 | **1,64** | **0,63** |
| J10 Hématite | 58,59 | 30,74 | 28,57 | 0,35 | 0,46 | 0,62 | **1,20** | **1,04** |
| K3 Terre verte de Bohème | 74,96 | -7,18 | 11,59 | 2,23 | 0,03 | 0,14 | **1,55** | **0,41** |
| L4 Terre d'ombre naturelle | 60,43 | 1,55 | 21,69 | 0,60 | 0,02 | 0,00 | **0,79** | **0,15** |
| K9 Terre de Cassel | 68,65 | 0,23 | 7,87 | 0,02 | 0,15 | 0,05 | **0,47** | **0,46** |
| K12 Terre d'ombre brûlée | 64,22 | 10,49 | 20,31 | 0,85 | 0,47 | 0,16 | **1,22** | **0,80** |
| N1 Malachite | 74,83 | -26,69 | 11,21 | 0,28 | 0,34 | 0,05 | **0,82** | **0,62** |
| N4 Terre verte de Vérone | 57,59 | -2,91 | 27,59 | 2,26 | 0,03 | 0,18 | **1,57** | **0,46** |
| N10 Outremer naturel (Lapis Lazuli) | 41,44 | 21,36 | -57,5 | 0,39 | 0,75 | 2,09 | **1,80** | **1,69** |
| M15 Smalt | 71,64 | -1,42 | -15,12 | 0,44 | 0,01 | 0,42 | **0,93** | **0,65** |
| P1 Résinate de cuivre | 82,52 | -24,2 | 2,98 | 0,01 | 0,13 | 0,12 | **0,51** | **0,50** |
| P4 Bleu égyptien | 60,6 | -10,99 | -28,7 | 1,58 | 0,66 | 0,07 | **1,52** | **0,85** |
| O9 Azurite | 71,78 | -7,54 | -13,39 | 0,55 | 0,01 | 0,29 | **0,92** | **0,55** |
| O12 Noir de noyaux | 58,38 | 0,18 | -1,62 | 0,06 | 0,00 | 0,05 | **0,33** | **0,21** |
| O15 Noir d'ivoire | 65,12 | 0,54 | 1,27 | 1,99 | 0,01 | 0,05 | **1,43** | **0,24** |
| Q3 Cendres vertes | 81,18 | -16,99 | 1,48 | 0,10 | 0,22 | 0,24 | **0,75** | **0,68** |
| Q9 Cendres bleues | 73,85 | -5,69 | -20,43 | 1,41 | 0,28 | 0,65 | **1,53** | **0,96** |
| Q12 Noir de fumée | 64,67 | -0,2 | -2,64 | 1,56 | 0,00 | 0,13 | **1,30** | **0,36** |
| **Moyennes $\Delta E_{ab}$ et $\Delta_{ab}$** | | | | | | | **1,24** | **0,78** |

*Tableau 23 - Coordonnées CIE-LAB et des Écarts de Couleur $\Delta E^*_{ab}$ pour les Pigments du XVII^e Siècle sous Éclairage D65*

### 6.6.4 Vers une meilleure estimation perceptive des écarts colorimétriques : $\Delta E_{94}$ et $\Delta E_{00}$

L'espace CIE 1976 L*a*b*, bien qu'introduit pour fournir une représentation perceptuellement uniforme de la couleur, ne permet pas toujours d'assurer une correspondance fidèle entre la distance euclidienne $\Delta E^*_{ab}$ et la différence de couleur perçue. Cette limitation est particulièrement manifeste dans les zones saturées ou sombres, où la sensibilité humaine aux écarts chromatiques varie significativement. Pour pallier ces insuffisances, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a successivement introduit deux modèles améliorés : $\Delta E_{94}$ (CIE94) et $\Delta E_{2000}$ (CIEDE2000), destinés à mieux refléter la perception visuelle humaine des écarts de couleur.

**La métrique $\Delta E_{94}$ (CIE94)**

La formule $\Delta E_{94}$repose sur une pondération différenciée des composantes lumineuse ($\Delta L^*$), chroma ($\Delta C^*$), et teinte ($\Delta H^*$) :

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \qquad \textit{Eq. ( 62 )}$$

avec les définitions suivantes :

- $\Delta L^* = L^*_2 - L^*_1$
- $C^*_i = \sqrt{a^{*2}_i + b^{*2}_i}$, et donc $\Delta C^* = C^*_2 - C^*_1$
- $\Delta H^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C^{*2}}$, qui représente la variation de teinte indépendamment de la chroma

Les facteurs de pondération $S_L$, $S_C$ et $S_H$ sont définis empiriquement pour refléter la sensibilité relative de l'observateur :

$$S_L = 1, \quad S_C = 1 + K_1 C_1^*, \quad S_H = 1 + K_2 C_1^*$$ *Eq. ( 63 )*

avec $K_1$= 0.045 et $K_2$ = 0.015 pour les applications standards. Les coefficients d'échelle $k_L$, $k_C$, $k_H$ sont fixés à 1 dans des conditions normales, mais peuvent être modifiés dans des contextes particuliers (textile, cosmétique, etc.).

**La métrique $\Delta E_{00}$ (CIEDE2000)**

La métrique $\Delta E_{00}$ constitue une avancée majeure en introduisant des termes correctifs non linéaires pour tenir compte :

• de l'interaction entre chroma et teinte,

• de la dépendance du seuil perceptuel à la position dans l'espace CIE-LAB,

• et d'un couplage empirique (rotation hue) dans les régions bleu-violet, connues pour leur instabilité perceptuelle.

Sa formulation complète est la suivante :

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \cdot \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)\left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)}$$ *Eq. ( 64 )*

où :

• $\Delta L' = L_2^* - L_1^*$ (avec correction de compensation pour les faibles luminances),

• $\Delta C' = C_2'^* - C_1'^*$ (chroma corrigée selon une moyenne ajustée),

• $\Delta H'$ est la différence de teinte corrigée en utilisant l'angle moyen de teinte $\bar{h}'$,

$$h_i^* = \arctan\left(\frac{b_i^*}{a_i^*}\right), \quad \bar{h}' = \text{fonction ajustée de } h_1^* \text{ et } h_2^*$$

• $R_T$ est un terme de rotation introduit pour ajuster la différence de teinte dans les zones critiques :

$$R_T = -2 \cdot R_C \cdot sin(2\Delta\theta)$$ *Eq. ( 65 )*

avec $R_C$ fonction de la chroma moyenne et $\Delta\theta$ une rotation angulaire dépendante de la position moyenne dans l'espace teinte.

Les définitions exactes de $S_L$, $S_C$ et $S_H$, ainsi que les fonctions intermédiaires, sont détaillées dans la recommandation technique CIEDE2000 (CIE TC1-47, 2001). Elles assurent une sensibilité accrue dans les zones où l'œil humain est plus exigeant (faibles contrastes, transitions délicates), tout en comprimant les écarts dans les régions de faible discrimination visuelle.

Remarque : Pour la validation expérimentale, la métrique $\Delta E_{00}$ est aujourd'hui la référence dans les protocoles d'évaluation perceptive, notamment dans les travaux de calibration colorimétrique de capteurs multispectraux, les normes ISO d'impression, ou la conservation des biens culturels où des écarts $\Delta E_{00}$ < 1 peuvent déjà être perceptibles par des observateurs experts.